Universitat Autònoma de Barcelona
Facultat de Ciències
Departament de Física

Treball Final de Grau en Física

EFECTE D'ALTITUD: ESTUDI I REPRESENTACIÓ DE LA METEOROLOGIA DE LA ZONA DEL PEDERNAL MOSTRADA A L'OBRA PICTÒRICA DE LA GEORGIA O'KEEFFE

Emma Betrán Clos
Supervisat per Dr. Josep Vidal i Dr. Jeroni Lorente

- Convocatòria Juliol 2024 -

Resum

Aquest treball crea un mètode per estudiar la meteorologia d'anys passats de la zona de New Mèxico més propera a la muntanya Pedernal. No hi ha gaires dades ni estudis sobre ella així que pretén omplir aquest buit. El mètode està automatitzat per poder usar-lo per un transcurs de temps de varis anys. Tanmateix, com el focus és la creació del mètode i no tant l'obtenció de molts resultats, per a aquest treball el mètode només s'ha aplicat pel 2022. Tot i així, està preparat per ser utilitzat per qualsevol dels altres anys dels que hi ha dades de radiosondatges d'Alburquerque i treure'n resultats ràpidament. Finalment, el mètode produeix uns perfils de temperatura fiables de la zona del Pedernal, estudia l'estratificació de l'aire de la zona, calcula el Nivell de Condensació per Elevació i prediu quins dies és molt probable que s'hagin format núvols orogràfics per elevació forçada.

Índex

1 Motivació i objectius **3**

2 Cerca i manipulació de dades **3**
2.1 Descripció de les dades . . . 3
2.2 Perfils de temperatura . . . 5
2.2.1 Gràfiques per comparar la diferència entre estacions . . . 6
2.2.2 Gràfiques per comparar nit i dia . . . 8
2.2.3 Estacions de superfície . . . 9
2.2.4 Perfils de temperatura finals . . . 10
2.3 Detecció i predicció de núvols . . . 14
2.3.1 Humitat relativa . . . 14
2.3.2 Estabilitat d'estratificació . . . 17
2.3.3 Processos de formació de núvols . . . 22

3 Conclusions **25**

4 Possibles futures línies de treball **26**

5 Annex **27**
5.1 Gràfiques de temperatura bàsiques . . . 27
5.1.1 Tipus 1 . . . 27
5.1.2 Tipus 2 . . . 30
5.2 Diagrames Skew-T log-P . . . 31
5.3 Gràfiques per comparar les estacions . . . 32
5.4 Gràfiques per comparar nit i dia . . . 37

1 Motivació i objectius

En aquest treball es fa un estudi de la climatologia i meteorologia de la zona de New Mèxico més propera a la muntanya el Pedernal. Els resultats obtinguts els utilitzarà l'artista i científic Pep Vidal per fer la seva obra "Pedernal", guanyadora de la beca Leonardo, de la fundació BBVA, destinada a investigadors i creadors culturals.

L'obra s'inspira en una obsessió de la pintora Georgia O'Keeffe. Ella estava fascinada per la muntanya el Pedernal, a New Mèxico. Per això, la va estar pintant tot sovint al llarg de la seva vida per tal de quedar-se-la. Per tant, planteja una manera més íntima de posseir quelcom, no per haver-ho pogut comprar amb diners, sinó per haver-ho conegut i haver-hi dedicat el seu temps i la seva atenció. De manera anàloga, en aquesta obra, en Pep Vidal vol estudiar tots els elements físics que envolten la muntanya fins a conèixer-los prou com per quedar-se l'aire que envolta el Pedernal. Com hi ha molt poca informació de la zona, per fer-ho, utilitzarà els resultats obtinguts en aquest treball.

Així doncs, l'objectiu central del TFG és estudiar i conèixer les condicions meteorològiques i el comportament físic de l'aire que envolta la muntanya el Pedernal de New Mexico. Com és un objectiu molt ampli que es pot estudiar des de moltes perspectives, d'ell n'extraiem tres objectius més concrets que abordarem en aquest treball:

- Buscar dades i aconseguir utilitzar-les en Python mitjançant arrays del paquet de numpy.
- Fer visible les condicions meteorològiques representant els perfils de temperatura.
- Analitzar les condicions atmosfèriques detectant núvols i intentant predir com ha sigut la seva formació.

2 Cerca i manipulació de dades

2.1 Descripció de les dades

Un radiosondatge és la caracterització vertical de l'atmosfera mitjançant instruments transportats habitualment per un globus. Aquest va pujant i es van prenent mesures a diverses alçades.

És molt difícil trobar dades d'aquella zona, ja que està molt poc habitada i, per tant, poc estudiada. Tot i així, hem trobat dades de radiosondatges de les 4 estacions més properes proporcionades per la web de la universitat de Wyoming [8]. Aquestes estan a: Grand Junction (a 369km del Pedernal), Amarillo (a 433km), Dodge City (a 605 km) i Alburquerque (a 117km).

Es volen incloure les dades de les 4 estacions. Així, fent-ne una mitjana ponderada tenint en compte les distàncies, volem treure'n un valor aproximat de les de la muntanya. Vam prioritzar l'estació d'Alburquerque, ja que és la més propera, i vam complementar la informació amb altres estacions. Pensant-ho així tenia més sentit prendre les que estiguessin més al nord que Alburquerque, ja que aquesta estació ja dona informació del sud de la muntanya. Ja vam descartar utilitzar les dades d'Amarillo.

Aquests radiosondatges tenen mesures des dels 1619msnm (que és l'altitud a la que està Alburquerque) fins entre els 25000msnm i els 35000msnm, prenent dades cada poques desenes de metres. Hi ha 2 radiosondatges per dia: a les 12 del migdia i a les 00 de la nit en horari GMT+0. Entre el

segon diumenge de març i el primer de novembre, en aquesta la zona s'utilitza el Mountain Daylight Time i les dades es prenen a les 6 del matí i de la tarda en hora local. Durant la resta de l'any, utilitzen el Mountain Standard Time i les prenen a les 5 del matí i de la tarda en hora local. Es prenen mesures de la temperatura, la temperatura de rosada, la humitat relativa, relació de mescla i la direcció i la velocitat del vent.

El tractament i l'estudi de les dades s'han automatitzat. Per fer-ho, s'han preparat programes de Python que es poden aplicar a les dades de molts anys ràpidament. Aquests els podeu trobar en un "Repository"de Github a l'annex. Tot i això, en aquest TFG, com a exemple, ho aplicarem a un sol any. Això s'ha fet així, per tal de poder dedicar tot el treball a la creació del mètode d'anàlisi que podria ser aplicat per tots. Així, no perdrem massa espai mostrant els resultats de molts anys ja que, per respectar l'extensió màxima del treball, això ens obligaria a fer un estudi més superficial.

Aquestes dades venien en forma de taules que es mostren en la pàgina web. Es van transferir en un Excel i es va generar un codi de Python que pogués llegir-lo i convertir-lo en matrius manejables pel programa. Com les dades no estaven pensades per ser manipulades amb Python, eren difícils de llegir. La dificultat més gran d'aquest treball ha sigut trobar la manera de fer-ho. Si les dades vinguessin amb un fitxer fàcilment llegible per Python, hauria sigut automàtic i podríem haver dedicat més temps a la seva representació i anàlisi. A més, al llegir-les es perdien dades ja que no es van utilitzar les preses a totes les altituds. Per fer possible la lectura, només es van prendre les dades de les pressions/altituds amb més mesures. Per això, primer es va fer un programa que ens diu el nombre de dies d'un any en que s'han pres mesures en cada pressió. Així utilitzem les dades de les pressions en que més mostres hi ha.

Saber la pressió és pràcticament equivalent a saber l'altitud ja que estan relacionades (hi ha una relació exponencial decreixent). En la taula 1 indico les pressions de les mesures que s'utilitzen i a quina altitud aproximada tendeix a haver-hi aquesta pressió.

S'han fet dues matrius de tres dimensions, una per les mostres de dia i l'altra per les preses de nit. Si només utilitzem les dades de temperatura, les matrius són només de dues dimensions. Per poder parlar de les dades, anomenarem X_{ij} al valor de la matriu en la fila "i" i la columna "j", de la matriu dels valors presos durant el dia (00h en horari GMT+0 i 17h o 18h en hora local), i Y_{ij} al valor de la matriu en la fila "i" i la columna "j", de la matriu dels valors presos durant la nit (12h en horari GMT+0 i 5h o 6h en hora local). L'índex "i" ens indica el dia en que s'ha pres la mesura i el "j"a quina pressió.

Taula 1: Pressions treballades

pressió (hPa)	830.0	700.0	610.0	500.0	400.0	300.0
altitud aproximada (m)	1700	3000	4200	5650	7200	9200

pressió (hPa)	200.0	150.0	100.0	50.0	30.0	20.0
altitud aproximada (m)	11800	13650	16200	20500	23700	26200

2.2 Perfils de temperatura

Amb aquestes mesures es van generar tres tipus de gràfiques:

Tipus 1 -

Les del primer tipus són "*heatmaps*". L'eix z, presentat amb colors, dóna informació de la temperatura, l'eix y mostra la pressió en la que es pren les mesura i l'eix x el dia. S'ha fet aquest tipus de gràfic per les dades de dia i de nit per cada estació. A continuació, en la figura 1, presento la d'Alburquerque i les de les altres dues estacions estan en les figures 15 i 16 de l'annex.

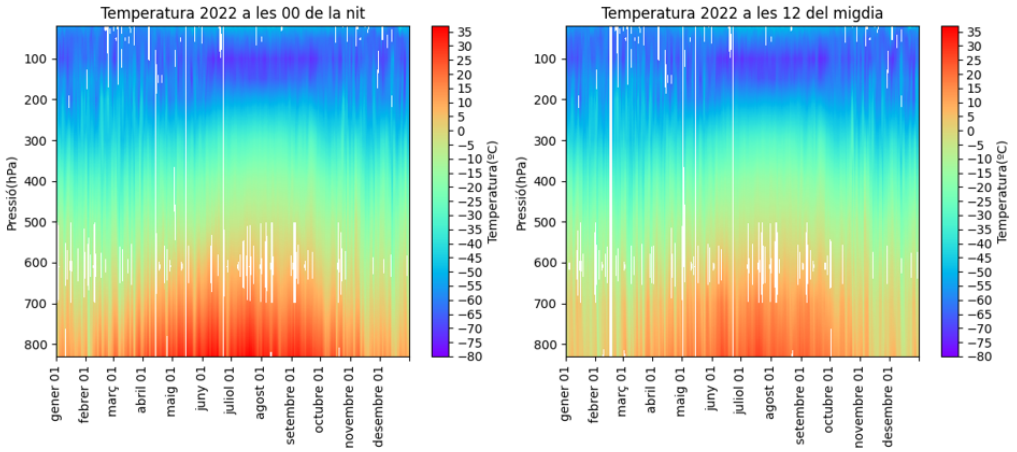


Figura 1: Gràfiques tipus 1 d'Alburquerque del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o 18h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h o 6h del matí a en hora local).

Tipus 2 -

Les del tipus 2 són generades per la funció de numpy plot. L'eix y mostra la temperatura i l'eix x el dia. S'ha fet aquest tipus de gràfic per les dades de dia i de nit per cada estació. A continuació, en la figura 2, presento la d'Alburquerque i les de les altres dues estacions estan en les figures 18 i 19 de l'annex.

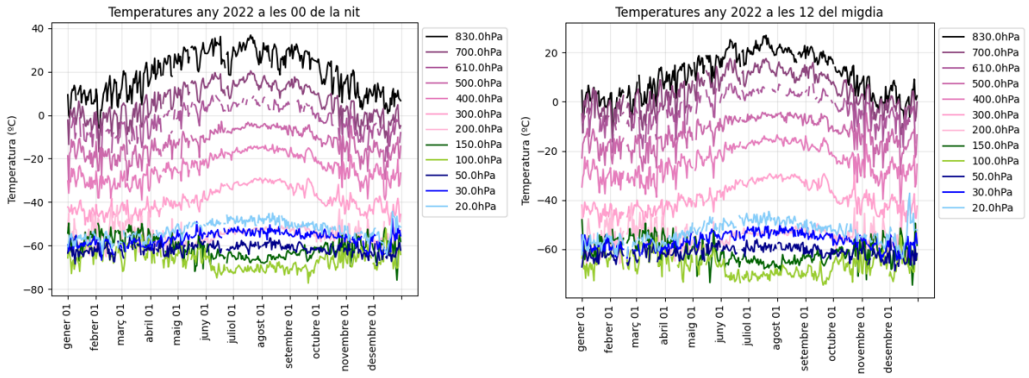


Figura 2: Gràfiques tipus 2 d'Alburquerque del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o 18h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h o 6h del matí en hora local).

Diagrames Skew-T log-P -

Recordem que tenim les dades ordenades en matrius 2D on una dimensió correspon al temps, sent cada posició un dia diferent, i l'altra a la pressió. Es va fer la mitjana de tots els dies en cada pressió (és a dir, per cada pressió tenim un valor: $\overline{X_j} = \frac{\sum_{i=0}^{n_j} X_{ij}}{n_j}$, on n_j són el nombre de dies dels que hi ha mesures en la pressió indicada per l'índex "j") i es van representar en diagrames de Skew-T log-P. A continuació, en la figura 3, presento els d'Alburquerque i els de les altres dues estacions estan en les figures 21 i 22 de l'annex.

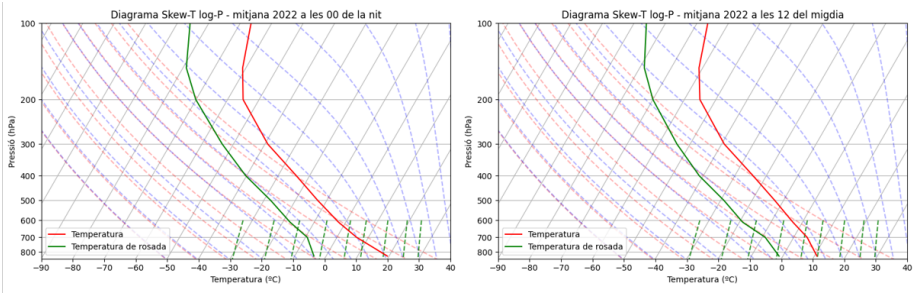


Figura 3: Diagrama de Skew-T log-P amb les mesures preses a Alburquerque el 2022. A l'esquerra, el generat amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o 18h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h o 6h del matí en hora local).

2.2.1 Gràfiques per comparar la diferència entre estacions

Un cop graficades les dades de les diverses estacions, ens van semblar molt similars entre elles, sobretot a baixes pressions (a molta altitud). Si realment són molt similars podem utilitzar les

d'una estació directament sense haver de fer interpolació. Per això, hem comparat les mesures de cada estació. Sobretot, volíem veure com canviaven les de Dodge City i les de Grand Junction respecte a Alburquerque, ja que aquesta és la més propera amb diferència.

Direm X^A, X^{DC} i X^{GJ} a les matrius de les mesures preses de dia a Alburquerque, Dodge City i Grand Junction i Y^A, Y^{DC} i Y^{GJ} a les matrius de les mesures preses de nit a les mateixes ciutats. Primer, hem restat les matrius X^{DC} i X^{GJ} a X^A, obtenint $F^{DC} = X^A - X^{DC}$ i $F^{GJ} = X^A - X^{GJ}$. També, hem restat Y^{DC} i Y^{GJ} a Y^A, obtenint $G^{DC} = Y^A - Y^{DC}$ i $G^{GJ} = Y^A - Y^{GJ}$. Aquestes matrius tenen els valors restats de cada dia i cada pressió ($G^{GJ}_{ij} = Y^A_{ij} - Y^{GJ}_{ij}$, $F^{GJ}_{ij} = X^A_{ij} - X^{GJ}_{ij}$, $G^{DC}_{ij} = Y^A_{ij} - Y^{DC}_{ij}$ i $F^{DC}_{ij} = X^A_{ij} - X^{DC}_{ij}$). Primer hem graficat les matrius resultants amb cada pressió per separat (G^{GJ}_j, F^{GJ}_j,G^{DC}_j i F^{DC}_j), aquestes gràfiques es mostren a l'annex en les figures 23, 24, 25 i 26. Tenen alguns pics de dies en que la diferència és grossa, aquests hi són perquè en alguna de les dues estacions no es va prendre la mesura en aquella pressió i per tant, la diferència queda molt grossa ja que només hi ha valor en una de les dues estacions. Si ignorem aquests pics veiem que la diferència entre estacions és només notable en les pressions més altes.

Per veure-ho amb més claredat, hem fet la mitjana de tots els dies per cada pressió obtenint dues matrius d'una sola fila: $\overline{F}$ i $\overline{G}$. Els elements d'aquestes matrius són: $\overline{F}_j = \frac{\sum_{i=0}^{n_j} F_{ij}}{n_j}$ i $\overline{G}_j = \frac{\sum_{i=0}^{n_j} G_{ij}}{n_j}$ (sent n_j el nombre de mostres presses en la pressió de l'índex j). Es van graficar les quatre matrius per treure-hi conclusions amb més facilitat i es presenten en les figures 4 i 5.

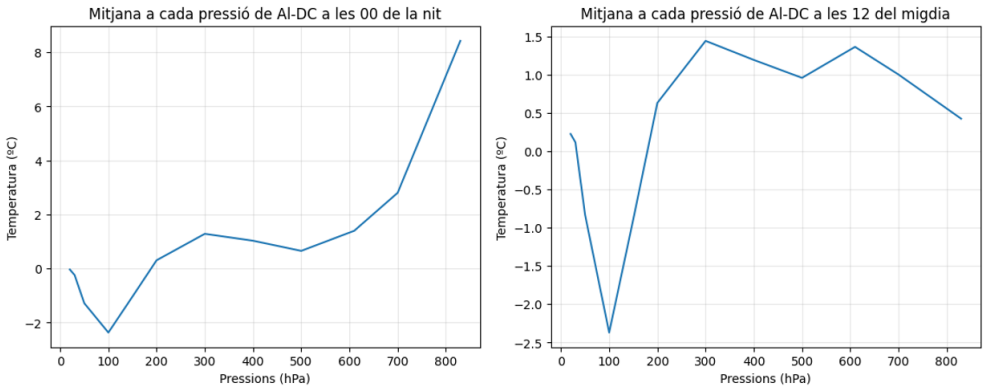


Figura 4: Gràfics de la mitjana de la diferència de temperatura entre Dodge City i Alburquerque per cada pressió. L'eix y indica la temperatura i el x la pressió. El de l'esquerra s'ha fet amb les mesures preses a les 00h en GMT+0 (17h o 18h en horari local) i les 12h en GMT+0 (5h o 6h en horari local)

En aquests gràfics veiem que: la diferència de temperatura entre les dues estacions llunyanes i Alburquerque oscil·la, més o menys, entre els -3°C i els 3°C per totes les pressions menys per les superiors als 700hPa. Això indica que les mesures només canvien entre les estacions notablement dels, aproximadament, 3100m d'altitud fins a terra.

Aquest resultat encaixa amb el que esperàvem. És predicible que la part més propera a terra sigui la més influenciada pel canvi d'estació per múltiples raons. La raó principal és que, com les estacions estan a diferents altures respecte al mar, en algunes la superfície estarà més propera a l'altitud en

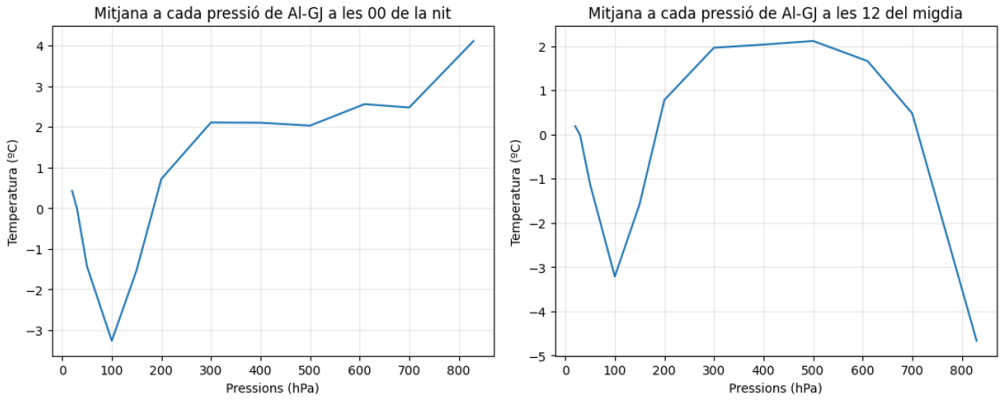


Figura 5: Gràfics de la mitjana de la diferència de temperatura entre Grand Junction i Alburquerque per cada pressió. L'eix y indica la temperatura i el x la pressió. El de l'esquerra s'ha fet amb les mesures preses a les 00h en GMT+0 (17h o 18h en horari local) i les 12h en GMT+0 (5h o 6h en horari local)

que es pren la mesura més baixa (a 800hPa, aproximadament 2000m) que en d'altres. Per això, en algunes veurem més l'efecte del sòl que en d'altres.

Després d'aquest procediment, veiem que la temperatura de l'aire dels 700hPa cap amunt és similar en les tres estacions. Per tant, no té sentit fer-ne cap mitjana ponderada per definir la del Pedernal. Per això, vam decidir utilitzar directament les mesures de l'estació més propera, Albuquerque.

2.2.2 Gràfiques per comparar nit i dia

També vam notar que sembla que no hi hagi gaire diferència entre les gràfiques de les mostres preses a la nit (12h en GMT+0 equivalent a 5 o 6 del matí en hora local) i les preses durant el dia (00h en GMT+0 equivalent a les 17 o les 18 de la tarda en hora local). El que s'explica a continuació es va fer també per Dodge City i Grand Junction, però, tenint en compte les conclusions de l'apartat anterior, parlarem només de les dades d'Alburquerque.
Per veure-ho amb claredat, vam restar la matriu de valors de temperatura de nit (Y) a la de valors de temperatura de dia (X). Així obtenim una matriu amb els valors resultants de la resta per cada dia i cada pressió. És a dir, els elements de la matriu D=X-Y són $D_{ij} = X_{ij} - Y_{ij}$. S'han graficat les matrius resultants amb cada pressió per separat D_j, aquestes gràfiques es mostren a l'annex en la figura 27, 28 i 29. Igual que en les d'entre estacions, hi ha alguns dies en que la diferència és molt notable, en aquests en alguna de les dues hores no es va prendre mesura en aquella pressió i, per tant, la diferència queda molt grossa perquè només hi ha valor en una de les dues estacions. Si ignorem aquests pics, veiem amb claredat que la diferència només es perceptible a la pressió 830hPa.

Per veure-ho millor, per cada pressió, fem la mitjana dels valors de la diferència de tots els dies de l'any i obtenim una matriu d'una sola dimensió amb un valor per cada pressió: $\overline{D}_j = \frac{\sum_{i=0}^{n_j} D_{ij}}{n_j}$ (n_j és el nombre de mesures preses en la pressió corresponent a l'índex "j") . Grafiquem els valors $\overline{D}_j$ respecte a les pressions i obtenim la figura 6. També podeu trobar les figures obtingudes en

Dodge City i Grand Junction en les figures 30 i 31 de l'annex.

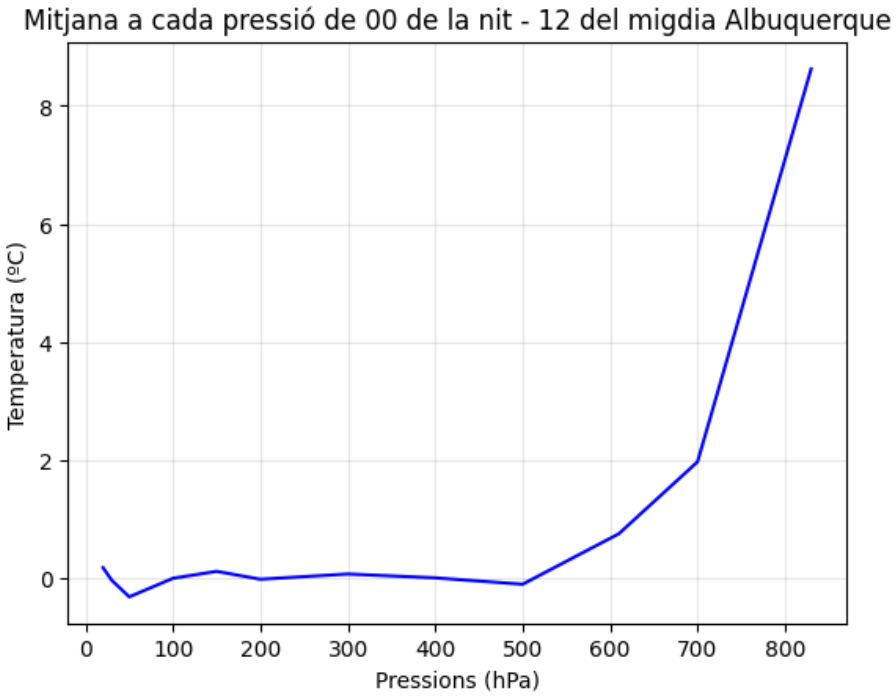


Figura 6: Mesures d'Alburquerque al 2022. Gràfic de la mitjana de la diferència de temperatura entre la nit i el dia per cada pressió. L'eix y indica la temperatura i el x la pressió.

Veient aquests gràfics, concloem que el canvi entre la nit i el dia és negligible fins als 700hPa. Per tant, només l'hem de considerar dels 700hPa cap a terra. L'aire acostuma a estar a aproximadament 700hPa al voltant dels 3100msnm. Per posar una referència, el Pedernal arriba als 3006msnm.

Igual que en l'apartat anterior, aquest resultat encaixa amb el que esperàvem, ja que, tocant la superfície hi ha la secció de l'aire més influenciada per la superfície (la forma d'aquesta, la calor que emet,...). El terra canvia molt de temperatura entre el dia i la nit degut a que de dia l'escalfa el sol i de nit no. Aquest canvi també afecta a la capa límit.

Amb això concloem que podem utilitzar les mesures de qualsevol de les dues hores per definir l'aire dels 700hPa cap amunt. Per això, decidim prendre només les dades i gràfiques de les 00h en GMT+0 (17h o 18h en horari local) en aquestes altures. Utilitzar les dues hores seria redundant.

2.2.3 Estacions de superfície

Com els 700 hPa equivalen a aproximadament 3100msnm i el Pedernal arriba als 3006msnm, amb les mesures dels radiosondatges a Alburquerque a les 00h en GMT+0 (17h o 18h en horari local) tenim informació de la temperatura de l'aire a sobre la muntanya. Per això, cal completar les dades amb valors de temperatura aproximats més propers a terra.

Per fer-ho, hem utilitzat les dades preses per les estacions de superfície de "Los Alamos National Laboratory"operat per la universitat de Califòrnia, el Departament d'energia dels Estats Units [3] [5]. Prendrem només les dades preses per la torre TA-6. Aquesta està a 35,8614°N 106,3196°W amb 2.262m d'altitud. Com està només a 38km de la muntanya, són dades molt fiables. Té 5 nivells de mesura a diferents alçades, però utilitzarem només les que té més amunt, a 92 metres del terra. Ho escollim així perquè tinguin el mínim efecte del terra possible. S'obtenen dades relacionades amb el vent i la precipitació i variables d'estat de l'atmosfera cada 15 minuts.

Aquestes dades venien ja col·locades en un Excel senzill de llegir. La pressió atmosfèrica en les dades és aproximadament 770hPa. Per tant, com les de radiosondatge eren molt fiables fins als 700hPa ens serveixen per completar-les.

2.2.4 Perfils de temperatura finals

Concloem que podem utilitzar les dades de radiosondatge d'Alburquerque preses de dia per caracteritzar de manera aproximada l'aire de dalt de la muntanya el Pedernal a partir dels 700hPa de pressió (aproximadament 3100m d'altitud) i les de superfície per completar la informació a 770hPa (aproximadament 2.262msnm). Com la zona tocant el Pedernal està a més altitud que 2.262 metres, aquestes dades són suficients per conèixer de manera aproximada la temperatura de la zona i no tindria sentit buscar-ne amb menys altitud. Això s'ha deduït estudiant el cas del 2022 però, com l'efecte de la superfície i l'altitud de les estacions són pràcticament iguals cada any, es pot aplicar el mateix mètode pels altres anys.
Els perfils de temperatura finals del 2022 són:

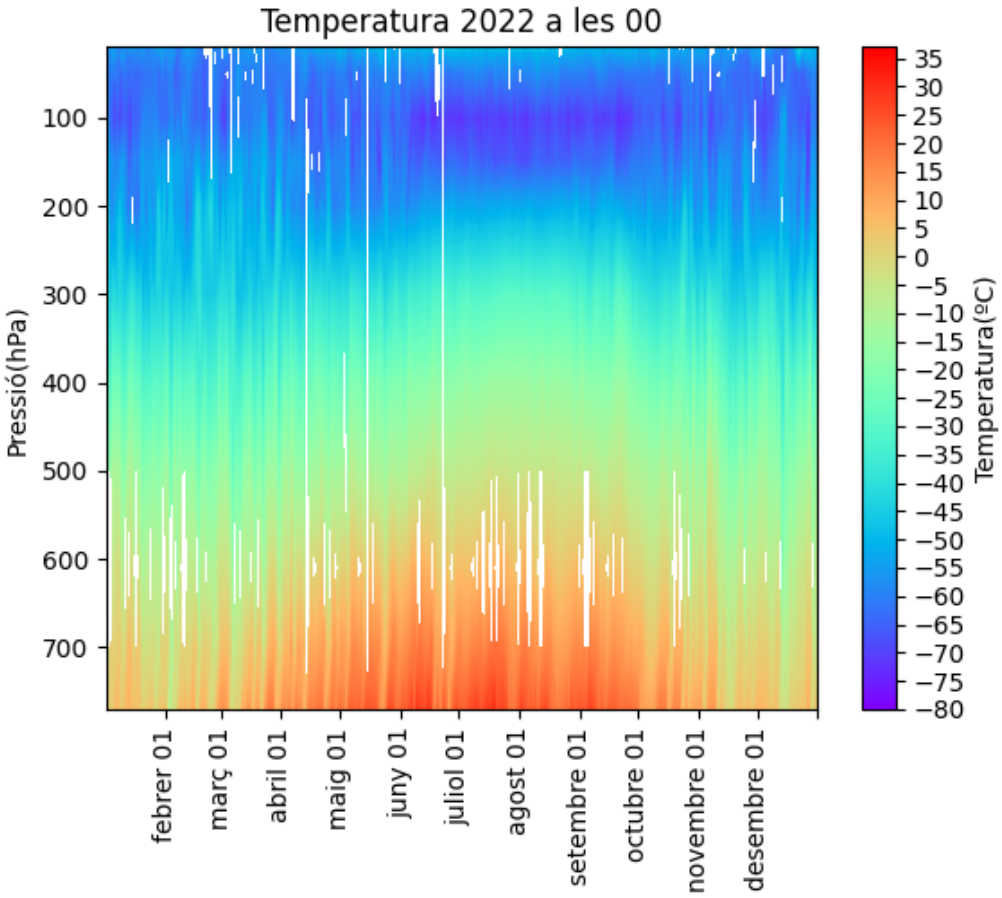


Figura 7: Gràfica tipus 1 generada ajuntant les dades del 2022 d'Alburquerque i Los Alamos preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o a les 18h de la tarda en hora local).

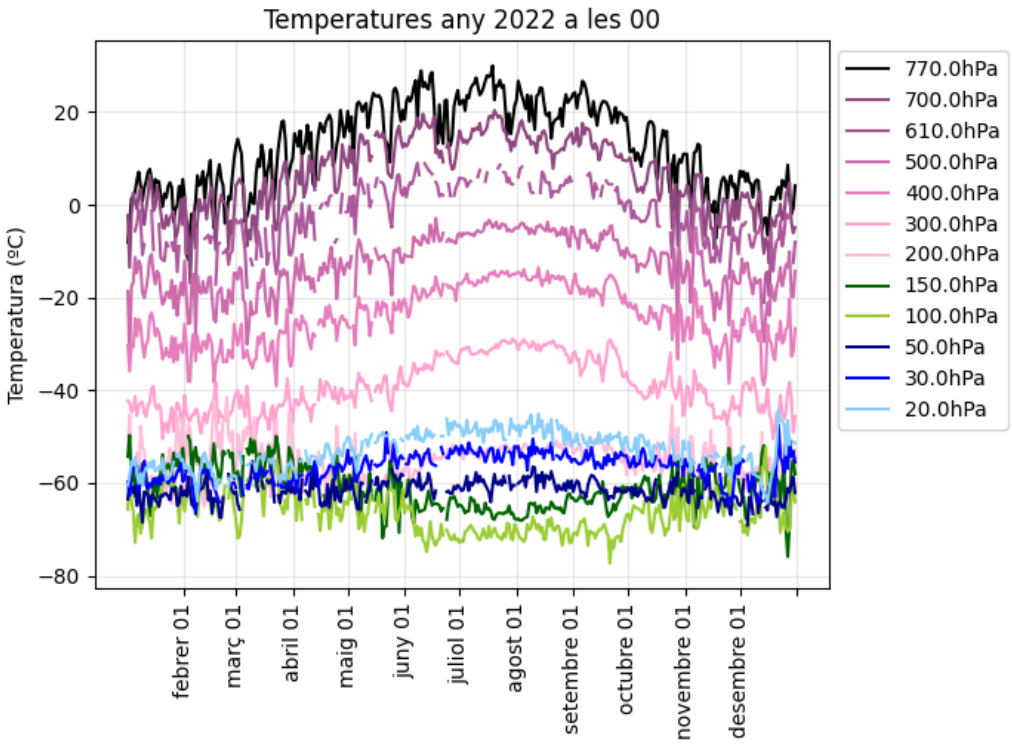


Figura 8: Gràfica tipus 1 generada ajuntant les dades del 2022 d'Alburquerque i Los Alamos preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o a les 18h de la tarda en hora local).

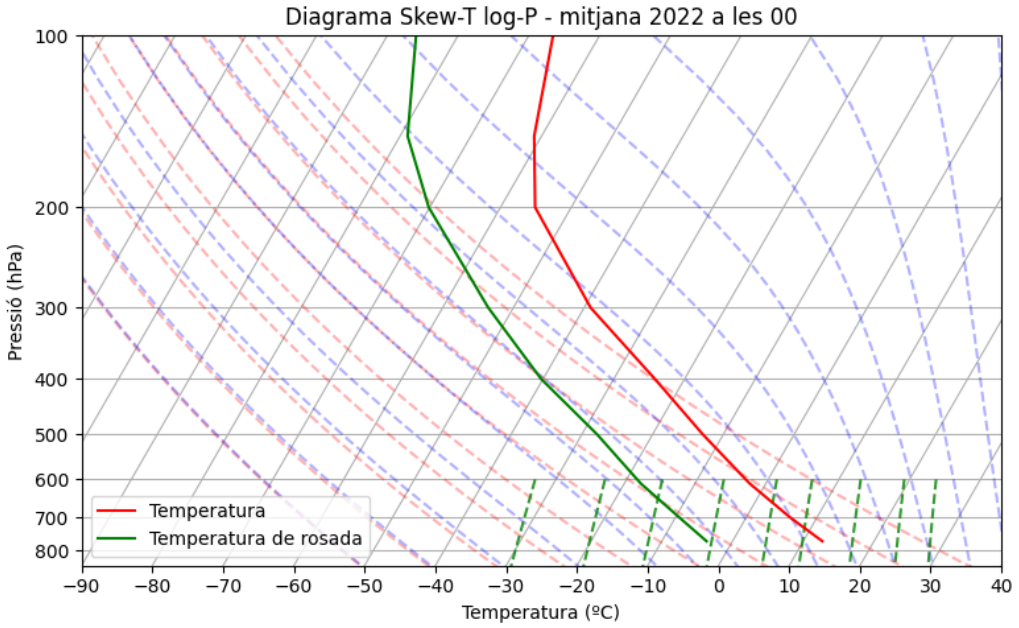


Figura 9: Diagrama de Skew-T log-P generat ajuntant les dades del 2022 d'Alburquerque i Los Alamos preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h o a les 18h de la tarda en hora local).

2.3 Detecció i predicció de núvols

2.3.1 Humitat relativa

En la pàgina web *Weather Spark* [7] s'hi troba la nuvolositat de cada dia a Alburquerque. En canvi, amb les nostres dades de radiosondatge creiem que es poden esbrinar, les altituds de la base i la part més alta dels núvols. Amb aquesta informació es podrien saber quin tipus de núvols hi ha i com s'han originat. Per aconseguir-la, utilitzarem la humitat relativa. A continuació, explicaré que és i com ens indica la presència de núvols.

I. Base teòrica -

Cal tenir clar què indica la humitat relativa i d'on ve [4]:

Direm "e"a la pressió parcial del vapor d'aigua i aquesta té un valor màxim "E", en el que l'aire estaria saturat. No es pot tenir una pressió de vapor superior a "E", ja que l'aigua precipitaria. Tant "e" com "E" depenen de la temperatura. La segona ho fa seguint l'equació de Clapeyron:

$$\frac{dE}{dT} = \frac{LE}{r_v T^2} \qquad on \qquad r_v = \frac{R}{M_v} \tag{1}$$

Sent R la constant dels gasos reals i M_v la massa molar del vapor. Per aconseguir la humitat relativa utilitzarem l'equació de Clapeyron en la forma:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{r_v T^2} dT \tag{2}$$

i la integrarem entre T i la temperatura de rosada (T_d).
Per entendre què és la temperatura de rosada, cal primer explicar que diem proporció de mescla a $r = \frac{m_v}{m_d}$ on m_v és la massa de vapor i m_d la massa d'aire sec (la massa de l'aire sense contar el vapor). Així, per una proporció de mescla i pressió atmosfèrica determinada, la temperatura de rosada (T_d) serà aquell en que l'aire queda saturat. En aquesta, E=e, ja que la pressió parcial de vapor d'aigua és la màxima.

Un cop entès això, integrem l'equació 2 entre T i T_d com hem dit:

$$\begin{gathered} \int_T^{T_d} \frac{dE}{E} = \frac{L}{r_v} \int_T^{T_d} \frac{dT}{T^2} \qquad -->\qquad \Big[lnE\Big]_T^{T_d} = \Big[\frac{L}{r_v T(-1)}\Big]_T^{T_d} \\ ln\left(\frac{E(T_d)}{E(T)}\right) = \frac{L}{r_v}\left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d}\right] \qquad -->\qquad \frac{E(T_d)}{E(T)} = exp\Big[\frac{L}{r_v}\left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d}\right]\Big] \end{gathered} \tag{3}$$

Recordem que, per la definició de la temperatura de rosada, es compleix $E(T_d) = e$. Així, prenent el resultat de (3), si definim la humitat relativa com a $U = 100\frac{e}{E(T)}$ tenim:

$$U = 100 exp\left(\frac{L}{r_v}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d}\right)\right) \tag{4}$$

La temperatura sempre és igual o superior a la de rosada. Quan és superior, la humitat relativa té un valor inferior al 100. En aquest cas, no hi ha cap núvol perquè l'aigua està en forma de vapor d'aigua dissolt en l'aire i aquest encara en pot absorbir més, ja que $e < E$. En canvi, quan la temperatura és igual a la de rosada, la humitat relativa és 100. L'aire no pot absorbir tot el vapor

Taula 2: Dies i altituds on s'ha detectat 100 d'humitat relativa.

día	altitud més baixa	altitud més alta
18 juny	16650 m	16769 m
19 juny	15342 m	16620 m
2 agost	15123 m	15123 m
7 agost	7463 m	14490 m
10 agost	14022 m	15748 m

d'aigua que hi ha, ja que $e = E$. Per això, aquest precipita i es forma núvol. Per tant, una humitat relativa de 100 indica la presència d'un núvol.

II. Detecció de núvols amb les dades dels radiosondatges. -

En aquest cas, no utilitzarem les dades de superfície. Com són mostres preses molt a prop del terra, aquestes serien útils per saber si hi ha boira. Tanmateix, la boira es dissipa amb facilitat, per tant, no confiem en que, si la detectem lluny del Pedernal, n'hi hagi també sobre d'ell. Per això, ens centrem en les dades de radiosondatge per detectar núvols.

Quan passi per dintre d'un núvol, la radiosonda llegirà 100 d'humitat relativa, indicant que l'aire està saturat. Així, allà on trobem aquest valor, sabrem que hi ha un núvol. Podem saber el gruix del núvol mirant en quantes altures seguides pren aquest valor. També on es troben la base i la part més alta d'aquests fixant-nos en les altituds més baixes i més altes en que l'aire està saturat en aquell dia.

Per això, hem preparat un programa que llegeix totes les dades d'un any i apunta en arrays els dies en que es detecta alguna humitat relativa de 100 i, per cada un d'aquests dies, la primera i l'última altitud en que això passa. Els resultats que aconseguim per l'any 2022 estan presentats en la taula 2.

En la taula 2, podem veure que s'han trobat aquests valors d'humitat relativa en 5 dies diferents a altituds molt altes.

Per una banda, ens sorprèn que les altituds que obtenim siguin de l'estratosfera perquè, menys en casos molt concrets, els núvols estan únicament a la troposfera. La part baixa de la tropopausa, la frontera entre les dues regions, acostuma a estar a aproximadament 11 km d'altitud, així que no esperem núvols més amunt d'aquest valor. Per això, vam mirar els diagrames de Stuve d'aquests casos. Com hem explicat en l'apartat de base teòrica, quan hi ha un núvol, la temperatura és igual a la temperatura de rosada. Per això, en el diagrama, veurem la zona on hi ha núvol de la corba d'estat enganxada a la de la temperatura de rosada. En tots els diagrames menys en el del 10 d'agost, hem vist que la temperatura de rosada i la corba d'estat es toquen en punts aïllats i no estan enganxades durant suficient altitud com per a crear núvols. Per tant, només pot haver-se creat un núvol estret el 10 d'agost, ja que en aquest les dues corbes estan juntes durant més altitud. Tanmateix, en el seu diagrama s'hi pot veure com la massa de vapor d'aigua és baixíssima. Per tant, tot i que la humitat relativa sigui 100 i el vapor d'aigua precipiti, no n'hi ha prou per formar un núvol. En l'estratosfera podem suposar que sempre passarà això, ja que l'aire sempre hi té poc

vapor d'aigua.

Per l'altra banda, també sorprèn que són molt pocs dies, és estrany que només hi hagi núvols 5 dies en tot un any. Tot i així, pot tenir sentit, ja que és una zona desèrtica i les mesures es prenen a les 17h de la tarda. Per comprovar que sigui així, ho comparem amb les dades de nuvolositat que ens dòna la pàgina web Weather Spark [7]. D'allà obtenim la figura 10, que mostra la nuvolositat detectada cada dia en el 2022.

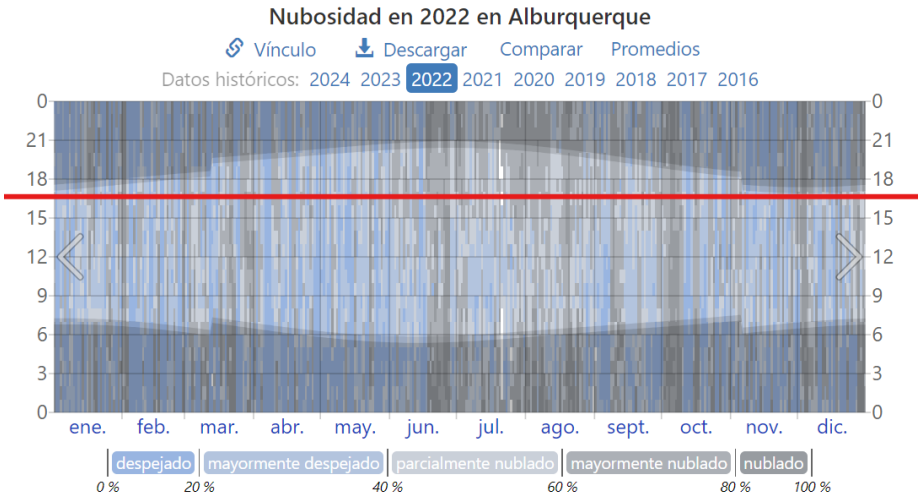


Figura 10: Informació donada per la pàgina web Weather Spark [7] sobre la nuvolositat en cada dia del 2022 a Alburquerque. La línia vermella indica la posició de les 17h, en la que es prenen les mesures del radiosondatge.

Ens ha sorprès com en aquesta pàgina semblen haver-hi núvols molts més dies dels que marca la taula 2. Això ens ha fet dubtar del nostre mètode. Creiem que aquest pot no detectar cap núvol tot i que n'hi hagi per dues raons:

- Com la radiosonda passa per una línia vertical concreta, pot ser que al voltant hi hagi algun núvol, però just per on passi no. Si la nuvolositat no és molt alta i el cel no està completament tapat. És molt probable que la radiosonda no passi pel mig dels núvols i, per tant, no noti que n'hi ha.
- La radiosonda pren poques mesures en la seva pujada, separades per molts metres d'altura entre elles. Així, si passa un núvol fi no el detectarà si no pren la mesura just en el núvol.

Per intentar remediar-ho, utilitzem el fet de que, a prop dels núvols, la humitat relativa tendeix a ser molt alta i pròxima a 100. Per això, fem un programa que detecti en quins dies i en quines altituds la humitat relativa és superior a 95 i, de nou, compararem el resultat amb la nuvolositat de la pàgina web. Així, tot i que la radiosonda no prengués la mesura just en el núvol, podríem detectar que n'hi ha un a prop. Aquest cop descartarem els casos a més de 11km d'altitud, ja que, com hem dit abans, l'aire no hi té suficient vapor d'aigua per crear núvols. Els resultats es presenten en la taula 3.

Taula 3: Dies i altituds en que s'ha detectat una humitat relativa superior a 95.

dia	altitud més baixa	altitud més alta
1 gener	2935 m	3752 m
3 febrer	2309 m	2743 m
18 juny	5687 m	16865 m
26 juny	4881 m	4952 m
27 juny	5920 m	5936 m
30 juliol	4196 m	4196 m
7 agost	5235 m	14310 m
19 agost	5186 m	5244 m
21 agost	4191 m	5545 m
5 desembre	3846 m	3846 m

Aquest cop, els resultats s'adapten més al que veiem en la figura 10. En tots els dies de la taula 3 menys en un es marca alta nuvolositat en la figura 10. Segurament, en el dia en que no coincideixen, hi ha hagut una humitat superior a 95 sense que hagi arribat a 100 o la radiosonda ha passat per un núvol molt petit sense que n'hi hagi hagut prou per que causessin gaire nuvolositat.

Tanmateix, continuem sense haver detectat la majoria dels dies en que es marca nuvolositat en la web. Concloem que les mostres de radiosondatges no són suficients per al que volíem estudiar. És a dir, si el cel no està completament cobert, és fàcil que no passi per cap núvol i, com pren mesures cada molts metres, si un núvol és prim pot no detectar-lo. Per tant, només els dies en què el cel estigui completament tapat podrem saber què hi ha núvols i quin gruix tenen. Com és una zona desèrtica i són les dades preses a les 17h de la tarda, això no passa sovint. Per a aquesta zona ens farien falta un altre tipus de dades.

2.3.2 Estabilitat d'estratificació

—

Per poder estudiar el comportament de l'aire és molt útil saber si la seva estratificació és estable, indiferent o inestable. A continuació, explicaré a què fan referència aquests termes i com descobrir-ho amb les dades que tenim [2] [4].

I. Base teòrica -

Si una massa d'aire està envoltada d'aire amb una densitat diferent, tendirà a pujar o baixar. Com la composició i la pressió d'aquesta i l'ambient tendeixen a ser similars, la diferència en la densitat dependrà principalment de la temperatura. D'aquesta manera, si la massa d'aire està més calenta, tindrà menys densitat i pujarà. En canvi, si està més freda, en tindrà més i baixarà.

Considerant que puja o baixa adiabàticament, aquest moviment es frenarà o es perpetuarà depenent de la relació entre el gradient vertical de la temperatura de l'atmosfera i l'evolució de la temperatura de la massa d'aire al moure's adiabàticament. Sense estar més familiaritzats amb aquests dos conceptes i l'impacte que tenen en el moviment de l'aire, és difícil entendre aquesta frase. Per això, anem a parlar-ne i així prendrà sentit.

Gradient vertical de la temperatura de l'ambient (α) —
La temperatura de l'ambient depèn directament de l'altitud. De manera que:

$$T(z + \Delta z) = T(z) - \alpha \Delta z \tag{5}$$

Així, α és el gradient vertical de la temperatura de l'ambient. Per estudiar l'estabilitat compararem aquest valor amb l'evolució de la temperatura d'una massa d'aire que puja adiabàticament.

Evolució de la temperatura en una massa d'aire que puja adiabàticament (γ) —
Per conèixer aquest canvi, partim de la primera llei de la termodinàmica:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \tag{6}$$

On Q és la calor, W el treball i U l'energia interna. Com sabem que $\Delta U = c_p dT$ i $\Delta W = vdp$:

$$\Delta Q = c_p dT + vdp \tag{7}$$

On c_p és el calor específic a pressió constant i $v = \frac{V}{m}$ el volum específic.
Considerant que evoluciona adiabàticament $\Delta Q = 0$ i substituint $dp = -\rho g dz$. S'obté:

$$0 = c_p dT + v\rho g dz \quad ----> \quad -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \tag{8}$$

Sabent que $g \approx 9,8 Jkg^{-1}$ i, en el cas de l'aire sec, $c_p \approx 1005 J°C^{-1}kg^{-1}$. Obtenim que la variació de temperatura que pateix una massa d'aire que puja adiabàticament és:

$$\gamma = \frac{g}{c_p} = 0,98°Chm^{-1} \approx 1\frac{°C}{hm} \tag{9}$$

Efecte de la relació entre γ i α sobre el moviment de l'aire. —
Parlarem de l'ascens de l'aire, però el descens funciona d'una manera molt similar. Recomano que llegiu l'explicació següent mirant la imatge 11.

Com hem dit abans, quan una massa d'aire està més calenta que l'aire de l'ambient que la rodeja, puja adiabàticament. Al pujar, la seva temperatura canvia seguint $T'_m(z) = T_m(z_o) - \gamma \Delta z$ (sent z_o l'altitud inicial i $\Delta z = z - z_o$). En canvi, la temperatura de l'aire de l'ambient que rodeja la massa, a una alçada z és $T_a(z) = T_a(z_o) - \alpha \Delta z$.
Hi ha 3 casos possibles:

- Aire estable ($\alpha < \gamma$): En aquest cas, al pujar i augmentar la z, la massa es refreda més ràpidament que l'ambient que la rodeja. Per això, a partir d'una z en concret, serà més freda que l'ambient i, al tenir més densitat, tornarà a baixar. Això frena els desplaçaments verticals de l'aire.
- Aire indiferent ($\alpha \approx \gamma$): La relació entre gamma i alpha no alterarà el moviment. És un cas habitual quan hi ha vent, ja que l'aire es va movent amunt i avall fins a quedar amb una α similar a la γ de l'ascens adiabàtic.
- Aire inestable ($\alpha > \gamma$): Quan la massa puja, es refreda més lentament que l'aire de l'ambient. Per això, cada cop és més gran la diferència de temperatura entre els dos. Això causa que la massa es mantingui més calenta que l'ambient i tendeix a continuar el moviment vertical.

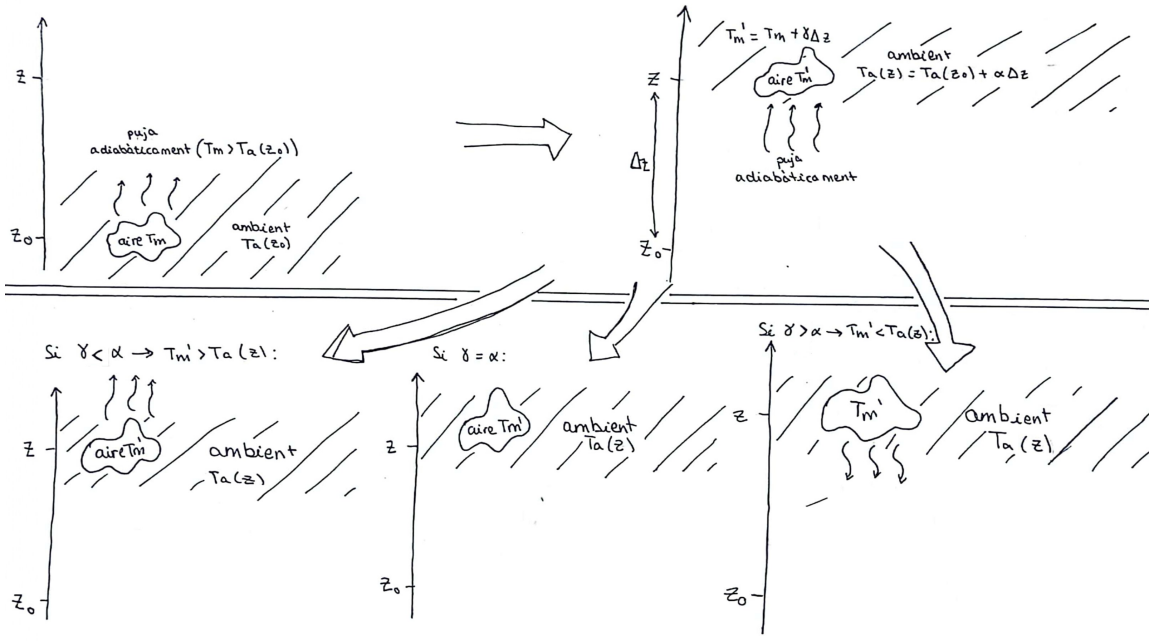


Figura 11: Esquema dels tipus d'estratificació.

Un cop explicada l'estratificació de l'aire, falta veure com la podem conèixer amb les dades dels radiosondatges. En aquestes, no hi ha els valors γ i α, però sí la temperatura potencial (θ) de cada dia en diverses altures. Per això, a continuació veure'm com està relacionada amb l'estratificació [2].

Criteri d'estabilitat en funció de la temperatura potencial (θ) —
La temperatura potencial (θ) és la temperatura que tindria una massa d'aire de l'ambient en que fem la mesura si se la dugués adiabàticament a 1000 hPa. També l'anomenarem THTA i és directament proporcional a la temperatura. Si la temperatura d'una massa d'aire és inferior o superior a la de l'ambient, també ho serà la θ. Per això, igual que amb la temperatura, si la temperatura potencial de la massa és superior o inferior a la de l'ambient, aquesta pujarà o baixarà. Com al pujar adiabàticament no canvia la θ de la massa, podem definir l'estabilitat segons la θ de l'ambient.

- Aire estable: θ de l'ambient creix amb l'altitud $\frac{d\theta}{dz} > 0$
- Aire indiferent: θ de l'ambient no canvia gaire amb l'altura $\frac{d\theta}{dz} \approx 0$
- Aire inestable: θ de l'ambient decreix amb l'altura $\frac{d\theta}{dz} < 0$

Sabent això, falta veure com ho podem utilitzar amb les dades dels radiosondatges per conèixer l'estabilitat de l'aire.

II. Manipulació de les dades de radiosondatge per conèixer l'estratificació —
Ens interessa l'estratificació de l'aire del voltant de la muntanya, així que cal considerar que aquesta comença aproximadament als 2500msnm i acaba als 3007msnm. Per això, ens hem concentrat en l'interval entre 800hPa (aproximadament a 2000msnm) i 700hPa (aproximadament a 3100msnm). Hi ha dades dels radiosondatges de tots els dies del 2022 presses a 700hPa, però no a 800hPa. Tanmateix, veiem que cada dia té una o més mesures en l'interval d'entre 750 i 800hPa. Per això, cada dia prenem dos valors. El primer és, simplement, la temperatura potencial a 700hPa i el segon és la mitjana dels valors de temperatura que s'hagin pres entre 750 i 800hPa aquell dia. Per cada dia calculem la diferència entre aquests dos valors restant el segon al primer (més endavant, direm difTHTA al valor resultant per facilitar l'escriptura). Així, tindrem 3 casos:

- Aquesta diferència és positiva $\rightarrow \frac{d\theta}{dz} > 0 \rightarrow$ aire estable
- Aquesta diferència és aproximadament $0 \rightarrow \frac{d\theta}{dz} \approx 0 \rightarrow$ aire indiferent
- Aquesta diferència és negativa $\rightarrow \frac{d\theta}{dz} < 0 \rightarrow$ aire inestable

Tot això s'ha fet amb els valors dels radiosondatges d'Alburquerque, sense utilitzar les dades de l'estació de superfície de Los Alamos. Com l'estabilitat de l'atmosfera no canvia gaire d'un lloc a un altre, considerem que és fiable fer-ho així.

III. Resultats d'aquesta manipulació —
Finalment, aplicant-ho al 2022, obtenim els resultats que es mostren a la figura 12.
El problema que trobem ara és que no sabem quan de proper al 0 ha d'estar el valor per considerar l'estratificació de l'aire indiferent i no estable o inestable. Per determinar-ho, hem estudiat l'estabilitat amb un altre mètode per comparar els resultats. S'ha fet mirant si l'aire es mostra estable, indiferent o inestable en els diagrames de Stuve de dies amb diferents difTHTA. No podríem determinar l'estabilitat de l'aire en tots els dies de l'any d'aquesta manera perquè seria molt lent, però ens va bé per analitzar alguns casos i definir el criteri per fer-ho automàticament en tots els valors d'un o més anys.

IV. Estudiar l'estratificació de casos concrets —
Mirar l'estratificació de l'aire d'un dia amb el seu diagrama de Stuve és senzill [4]. Com la corba d'estat ens dibuixa com varia la temperatura de l'aire, el seu pendent és el gradient vertical de la temperatura de l'ambient (α) i el pendent de les adiabàtiques indica com canvia la temperatura al pujar adiabàticament (γ). Per tant, només ens hem de fixar en quina de les dues està més inclinada o si són paral·leles.

- La corba d'estat està menys inclinada. $\rightarrow$ L'aire té estratificació estable.
- Estan més o menys igual d'inclinades. $\rightarrow$ L'aire té estratificació indiferent.
- La corba d'estat està més inclinada. $\rightarrow$ L'aire té estratificació inestable.

Al gener hi ha valors de difTHTA molt elevats. Per això, mirarem els diagrames de Stuve d'aquest mes per decidir a partir de quins podem considerar l'aire estable.

Analitzant els resultats presentats a la taula 4, deduïm que en valors superiors a 1,6 l'estratificació serà estable, entre 1,6 i 0,55 no ho sabem segur i en valors iguals o inferiors a 0,55 hi ha estratificació indiferent.

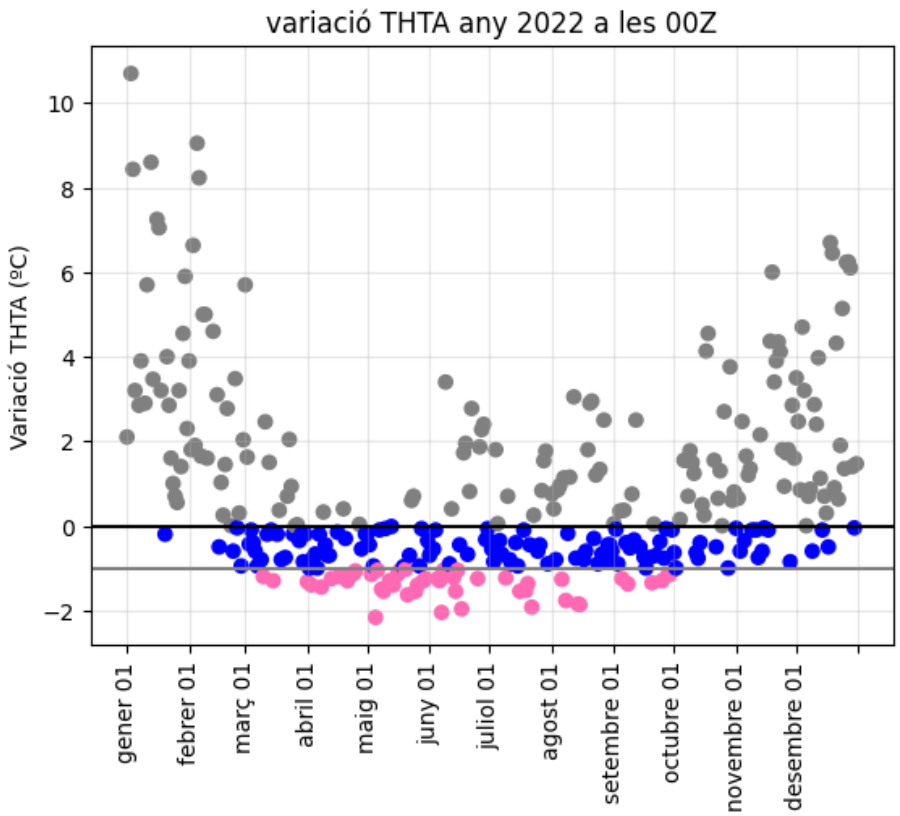


Figura 12: Resultats de calcular la diferència de la temperatura potencial esmentada prèviament (difTHTA).

Per determinar a partir de quina difTHTA considerem que l'aire és inestable, mirem els diagrames de Stuve dels dies en que aquesta és més petita. Veiem que tots en els que aquesta és un nombre negatiu tenen una corba d'estat paral·lela a les adiabàtiques seques menys en dos dies. El 6 de maig i el 8 de juny són els dies amb la diferència més petita (sent -2,17 i -2,05 respectivament) i tenen una corba d'estat lleugerament més inclinada que les adiabàtiques seques. Per tant, quan difTHTA està entre el -2 i el 0, podem confiar en que l'estratificació és indiferent i, si és -2 o més petit, pot ser tant indiferent com inestable.
Finalment tenim:

- Estratificació estable quan difTHTA > 1,6
- Estratificació estable o indiferent quan 1,6 > difTHTA > 0,55
- Estratificació estable quan 0,55 > difTHTA > -2
- Estratificació indiferent o inestable quan -2 > dif THTA

Taula 4: Taules de les observacions dels diagrames de Stuve més rellevants del gener.

día	diferència de THTA (θ)	inclinació de la corba d'estat respecte la adiabàtica seca
2 gener	2,1	menys inclinada
8 gener	2,85	menys inclinada
24 gener	1,6	menys inclinada
25 gener	1	una mica menys inclinada
26 gener	0,7	una mica menys inclinada
27 gener	0,55	paral·leles

2.3.3 Processos de formació de núvols

Normalment, els núvols es formen perquè aire amb una alta concentració de vapor d'aigua ascendeix. Així, la temperatura disminueix apropant-se a la de rosada fins a arribar a ser iguals. Les principals raons per la que aquest aire pot començar a pujar són:

- L'orografia
- Front d'aire fred
- Convecció tèrmica
- Turbulència o mescla

En el nostre cas, com estem estudiant l'aire en una muntanya (elevació orogràfica) i en la majoria de dies del 2022 l'aire té estratificació estable, el més probable és que es formin per elevació forçada per l'orografia (Normalent, passa té lloc quan l'estratificació és estable). [1] Aquests es creen quan el vent empeny aire contra la muntanya, forçant-lo a elevar-se seguint la seva forma. Així, puja adiabàticament i la seva temperatura disminueix més ràpidament que la temperatura de rosada. Per això, si aquest ja era humit abans de l'elevació, al pujar disminuirà la quantitat d'aigua que pot retenir l'aire i aquesta precipitarà formant núvols.

L'altitud on es formaran aquests núvols es diu nivell de condensació per elevació (NCE) i pot ser calculada amb la fórmula de Schubert.

I. Demostració de la fórmula de Schubert -

Per entendre-la i poder utilitzar-la primer explicarem d'on ve [4].
Recuperem l'equació de Clapeyron 1. En la temperatura de rosada, on (E=e), tindrà la forma següent:

$$\frac{de}{dT_d} = \frac{L(T)e}{r_v T_d^2} \tag{10}$$

Sabem que en una expansió adiabàtica es compleix:

$$\frac{de}{e} = \frac{dp}{p} = \frac{c_p dT}{r_d T} \tag{11}$$

Si ho apliquem a l'equació de Clapeyron en la temperatura de rosada 10, obtenim:

$$\frac{dT_d}{T_d} = \frac{r_v T_d de}{Le} = \frac{r_v T_d dp}{Lp} = \frac{r_v c_p T_d dT}{r_d LT} \tag{12}$$

Substituint els valors corresponents s'obté $\frac{dT_d}{T_d} \approx 6 \times 10^{-4}$. Utilitzant un valor aproximat de T_d aconseguim:

$$dT \approx \frac{1}{6} dT \tag{13}$$

Per tant, si $dT_d = \frac{dT}{6}$ i $\frac{dT}{dz} = -\gamma$, queda clar que $\frac{dT_d}{dz} = -\frac{\gamma}{6}$. Per definició, al nivell de condensació per elevació la diferència entre T i T_d és nul·la. Per tant:

$$\begin{aligned} (T - T_d)_{NCE} = 0 = (T - T_d)_0 + \frac{d}{dz}(T - T_d) z_{NCE} \\ z_{NCE} = \frac{6}{5\gamma}(T - T_d)_0 \end{aligned} \tag{14}$$

Aquesta última és la fórmula de Schubert i la utilitzarem per calcular el nivell de condensació per elevació (NCE). Aplicant l'aproximació $\gamma \approx 1C/100m$, usarem la fórmula en la forma $z_{NCE} = 100\frac{6}{5\gamma}(T - T_d)_0$.
Així, per obtenir el nivell de condensació per elevació d'un dia, només cal introduir la temperatura i la temperatura de rosada d'una altitud i sumar el resultat a aquesta altitud.

II. Càlcul del nivell de condensació per elevació (NCE) de cada dia —
Primer, prenem les dades de radiosondatge del 2022 i les passem totes per un algoritme que en calculi el nivell de condensació per elevació (NCE) de cada dia utilitzant la fórmula de Schubert. El resultat que obtenim és el que es mostra en la figura 13.
Com el pic del Pedernal està a 3007m, l'aire, forçat per l'orografia, s'elevarà fins a una mica més amunt d'aquesta altitud. Per això, només trobarem aquests tipus de núvols els dies en què la NCE estigui més avall d'aproximadament 3250msnm.

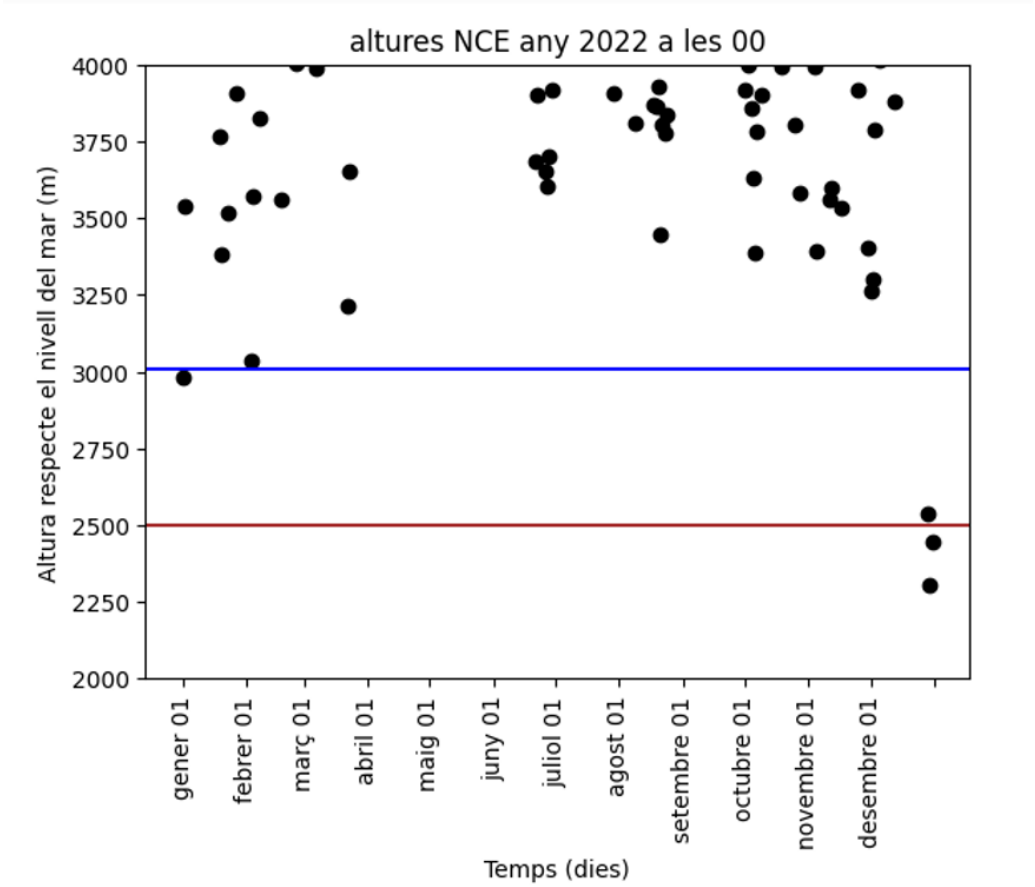


Figura 13: Nivell de condensació per elevació (NCE) de cada dia. La línia blava marca l'altitud del pic de la muntanya i la marró la de la base.

III. Cerca de dies amb núvols orografics creats per elevació forçada al 2022 -

Els dies en què és més probable que apareguin núvols orogràfics per elevació forçada són aquells que tenen:

- NCE $<$ 3250 msnm.
- Estratificació estable.

Per això, prenem els dies que compleixen NCE $<$ 3250 msnm i en mirem l'estratificació. Quan difTHTA sigui superior a 1,6 l'estratificació serà òptima per aquests tipus de núvols. En canvi, si és inferior a 0,55 sabem que no ho és. Si està entre aquests dos valors, ho mirarem en els diagrames de Stuve. Un cop fet això, obtenim la informació que es mostra a la taula 5.

Amb els resultats presentats, veiem que els dies del 2022 en què és molt probable que s'hagin originat núvols orogràfics d'elevació forçada són l'1 de gener, el 3 de febrer i el 29 de desembre.

Taula 5: Resultats que ens indiquen l'estratificació dels dies amb el NCE adequat.

dia	difTHTA (θ)	inclinació de la corba d'estat respecte la adiabàtica seca	estratificació
1 gener	nan	menys inclinada	estable
3 febrer	1,800	no ha calgut mirar-ho	estable
22 març	-0,750	no ha calgut mirar-ho	indiferent
29 desembre	6,100	no ha calgut mirar-ho	estable
30 desembre	1,400	paral·lela	indiferent
31 desembre	-0,050	no ha calgut mirar-ho	indiferent

3 Conclusions

- En l'apartat de perfils de temperatura del Pedernal, hem trobat les dades i els mètodes necessaris per representar-los d'una manera fiable per qualsevol any tot i la falta de dades directes.
  Això és molt important per a aquest treball, perquè no teníem dades de la muntanya i encara menys en diverses altures. Així, hem aconseguit unes dades que no existien i que haurien sigut molt difícils d'aconseguir amb instruments de mesura.

- Hem vist que les dades de radiosondatge no són suficients per detectar núvols i saber-ne l'altitud i el gruix. Per aconseguir-ho, en futures investigacions, s'haurien d'intentar obtenir altres tipus de dades, tot i que és una tasca difícil en aquella zona.

- Hem trobat un mètode automatitzat per conèixer l'estabilitat d'estratificació de cada dia i hem vist que en la majoria de dies del 2022 és estable, en altres indiferent i pràcticament mai és inestable. Això ens ajuda a poder predir quin tipus de núvol es podrien haver format.

- En una muntanya, quan l'estratificació és estable, és molt probable que es formin núvols orogràfics per elevació forçada. Aquests es formen a una altitud que anomenem Nivell de Condensació per Elevació (NCE). Tanmateix, per a que es formin han d'arribar a aquest nivell abans de que s'acabi l'elevació forçada. Com l'elevació forçada perdura durant tota l'altura de la muntanya i una mica més amunt, s'ha de complir que el NCE es trobi sota del pic de la muntanya o poc més amunt. Per això, en el següent apartat, s'ha trobat la manera de calcular el NCE de cada dia, d'una manera molt automatitzada. Així, amb aquesta part i el càlcul de l'estabilitat de l'estratificació, hem aconseguit trobar un mètode, que es pot aplicar a qualsevol any, per saber en quins dies és molt probable que s'hagin format aquest tipus de núvols amb les poques dades que tenim disponibles. Finalment, l'hem provat en l'any 2022 i, en aquest, els dies en què això passa són l'1 de gener, el 3 de febrer i el 29 de desembre.

4 Possibles futures línies de treball

- El mètode que hem usat per definir el perfil de temperatures es podria utilitzar per definir el perfil d'altres variables com el vent o la humitat relativa. Abans de fer-ho, s'haurien de comparar les dades entre estacions i hores, tal com s'ha fet amb la temperatura. Així, aconseguiríem veure si, amb altres magnituds, també podem suposar que les d'Alburquerque ens donen informació fiable de les del Pedernal o, en canvi, canvien massa d'un lloc a un altre i si ens dona informació considerar mostres de diverses hores del dia o és redundant.

- Si s'arribessin a trobar un altre tipus de dades es podrien combinar amb les dades del radiosondatge per saber quins dies hi ha hagut núvol i l'altitud i el gruix d'aquests. Per exemple, seria molt útil estudiar les imatges de satèl·lits proporcionades per GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) [6].

- En l'apartat d'estabilitat de l'estratificació, hem vist que hi ha molts dies en què és indiferent. Normalment, l'aire compleix aquesta condició quan ha estat barrejat per forts vents. Per això, en aquests dies es poden formar núvols de mescla. L'altitud a la que es formen es diu Nivell de Condensació per Mescla (NCM). Per tant, es podria calcular aquest nivell en cada dia per veure a quins dies podrien haver aparegut. El problema és que, a diferència d'en el Nivell de Condensació per Elevació, no hi ha manera d'automatitzar el procés de càlcul del NCM. L'única manera de trobar-lo és estudiant el diagrama de Stuve d'aquell dia en concret. Com aquest treball estava centrat en crear un mètode automatitzat que es pogués aplicar ràpidament a grans extensions de temps, no hi té molt sentit fer-ho. Tanmateix, si en el futur hi ha interès en estudiar algun any més en concret i, per tant, no es busca una automatització del procés, es podrien estudiar els diagrames de Stuve dels dies amb una estratificació de l'aire indiferent i saber en quins dies és molt probable que s'hagin format aquest tipus de núvols.

5 Annex

https://github.com/EmmaBetran/TFG-Emma
En aquest "Repository"hi ha els codis utilitzats en el meu TFG. Aquests codis tarden massa en compilar pel "google colab". Recomano utilitzar el "jupyter notebook". A continuació s'explica el contingut de cada fitxer:

- "mesures en cada pressió annex": Programa per saber quantes dades de cada pressió té l'excel. Així, s'han pres les dades de les pressions que tenen mesures quasi cada dia.
- "perfils de Temperatura annex": Programes utilitzats per prendre les dades com s'explica en l'apartat de "Descripció de les dades"del TFG, fer les gràfiques de tipus 1 i 2 i els diagrames de SkewT només amb les dades de radiosondatge i les gràfiques per comparar les dades preses a les 17h de la tarda i les preses a les 5h de la tarda.
- "comparar estacions annex": Programa per generar les gràfiques per comparar les dades de les 3 estacions. Per utilitzar aquest programa cal haver compilat el de "perfils de Temperatura annex"amb els 3 excels de les diferents estacions. (En el programa mateix s'explica com fer-ho).
- "afegir dades superfície annex": Programa per prendre les dades de superfície d'un altre excel, ajuntar-les degudament amb les de radiosondatge i generar les gràfiques tipus 1 i 2 i els diagrames de Stuve resultants de ajuntar els dos tipus de dades.
- "humitat relativa annex": Programa utilitzat en l'apartat "humitat relativa"del TFG per detectar núvols.
- "estratificació annex": Programa utilitzat per conèixer l'estabilitat de l'estratificació de cada dia i graficar el resultat.
- "càlcul z_NCE annex": Programa per calcular el Nivell de Condensació per Elevació en cada dia i graficar-ho.

5.1 Gràfiques de temperatura bàsiques

5.1.1 Tipus 1

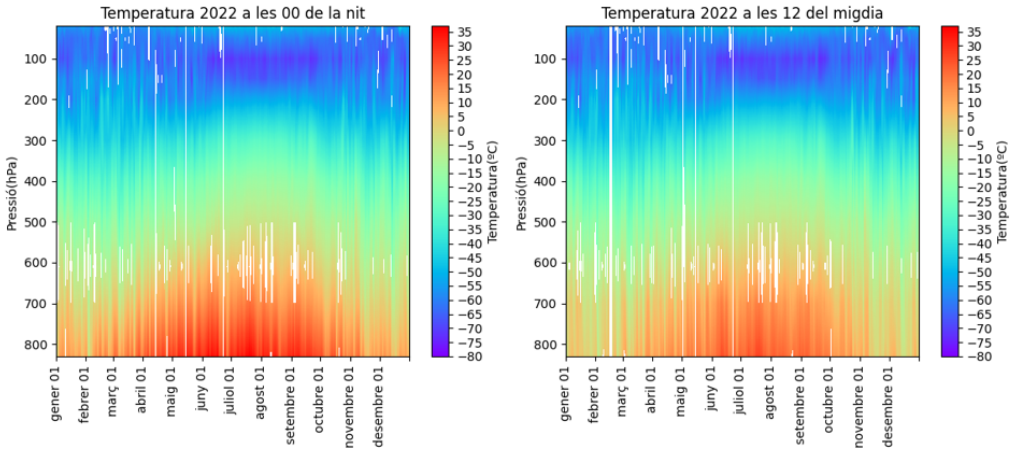


Figura 14: Gràfiques tipus 1 d'Alburquerque del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí a en hora local).

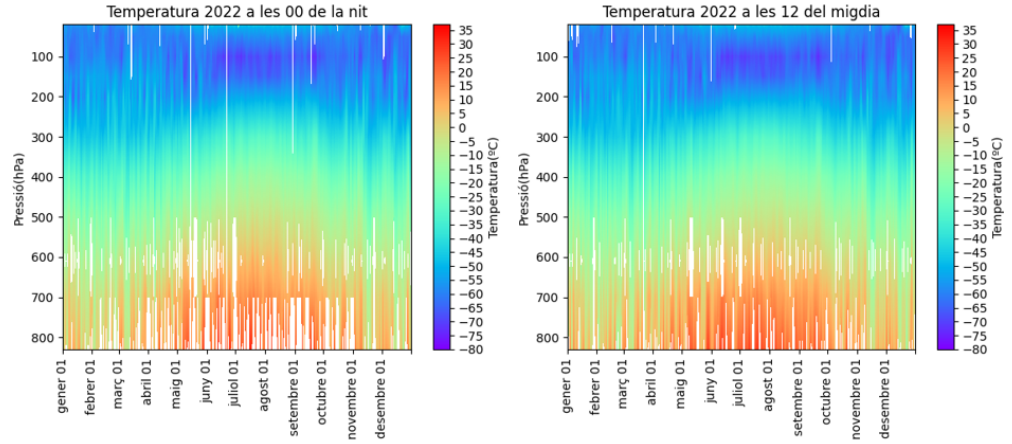


Figura 15: Gràfiques tipus 1 de Dodge City del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

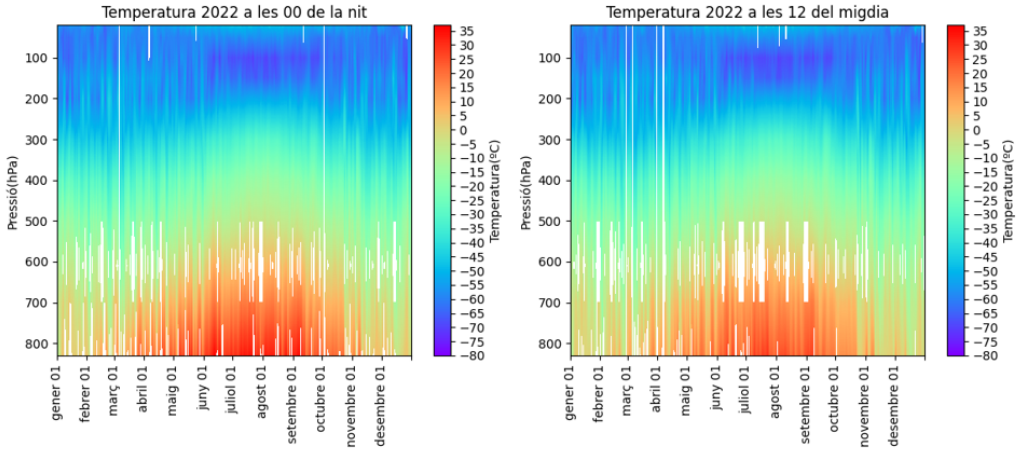


Figura 16: Gràfiques tipus 1 de Grand Junction del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí a en hora local).

5.1.2 Tipus 2

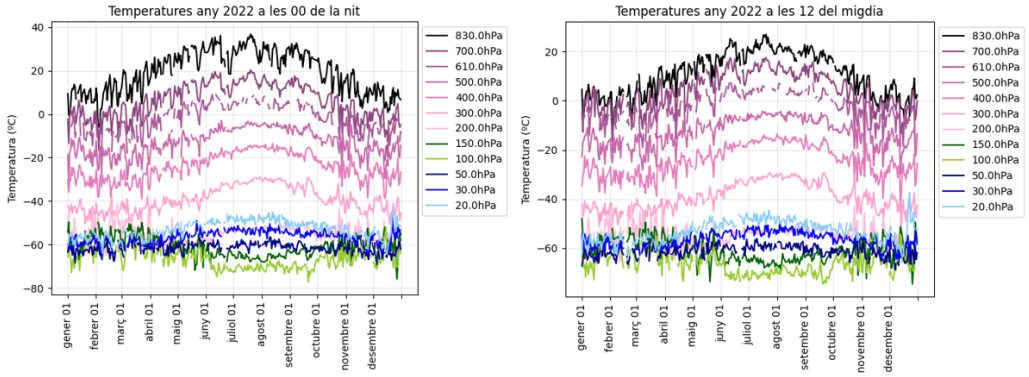


Figura 17: Gràfiques tipus 2 d'Alburquerque del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

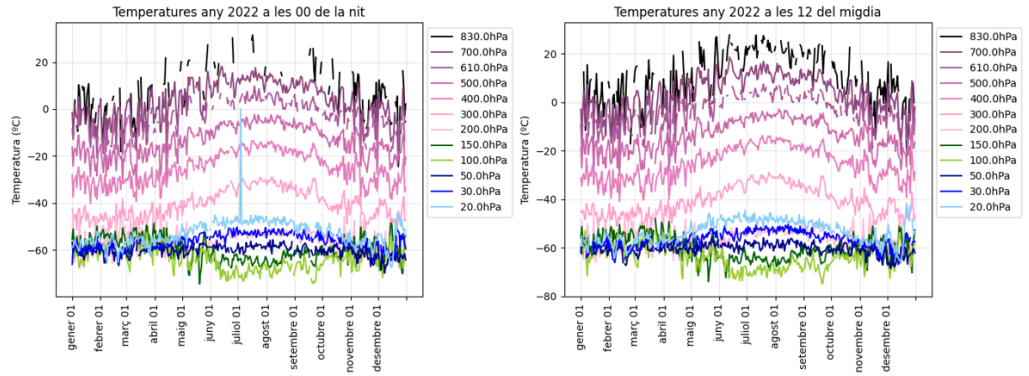


Figura 18: Gràfiques tipus 2 de Dodge City del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

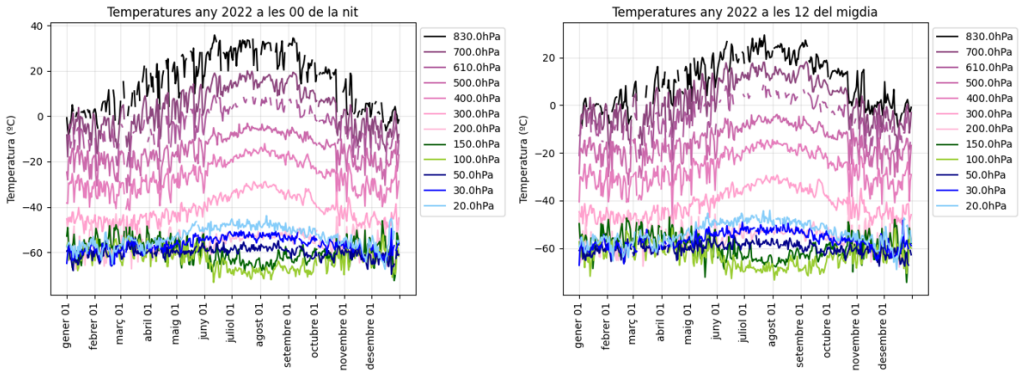


Figura 19: Gràfiques tipus 2 de Grand Junction del 2022. A l'esquerra, la generada amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

5.2 Diagrames Skew-T log-P

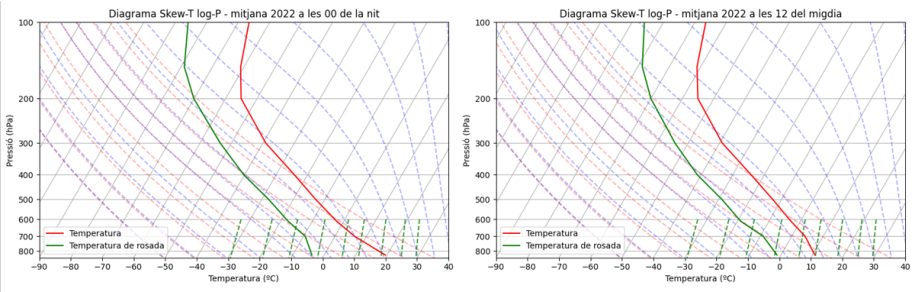


Figura 20: Diagrama de Skew-T log-P amb les mesures preses a Alburquerque el 2022. A l'esquerra, el generat amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

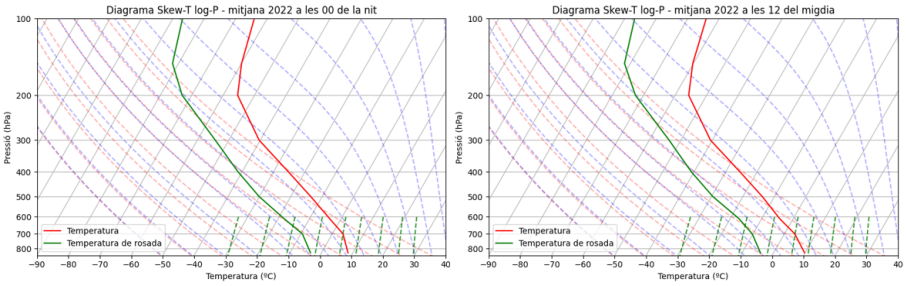


Figura 21: Diagrama de Skew-T log-P amb les mesures preses a Dodge City el 2022. A l'esquerra, el generat amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

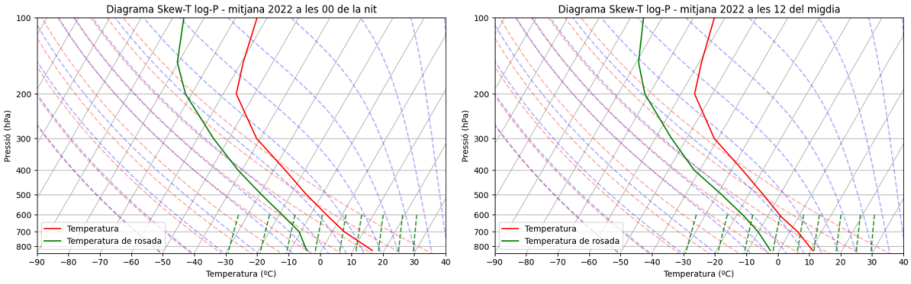
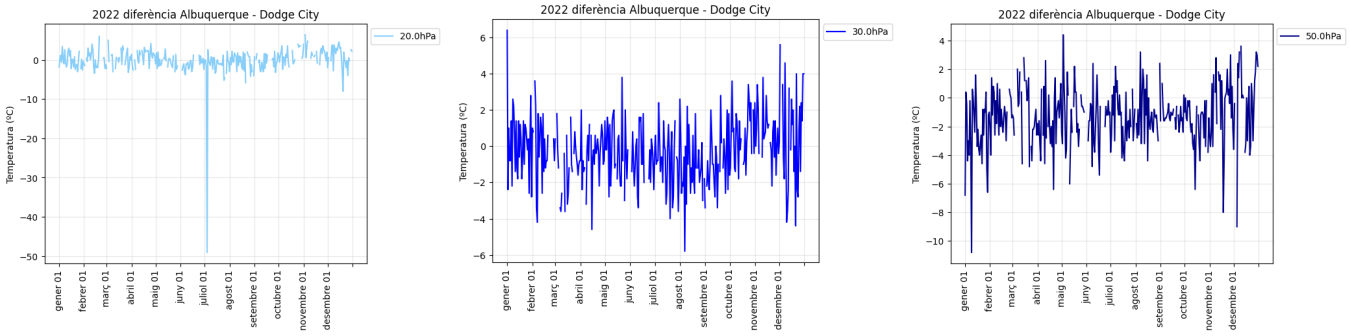


Figura 22: Diagrama de Skew-T log-P amb les mesures preses a Grand Junction el 2022. A l'esquerra, el generat amb les dades preses a les 00 en horari GMT+0 (a les 17h de la tarda en hora local) i, a la dreta, la generada amb les dades preses a les 12 en horari GMT+0 (a les 5h del matí en hora local).

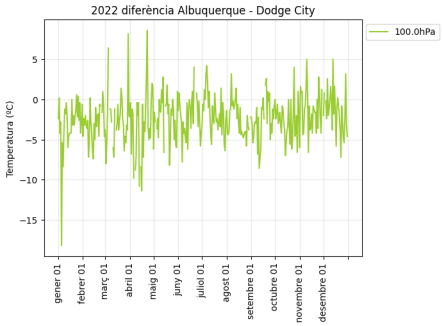
5.3 Gràfiques per comparar les estacions



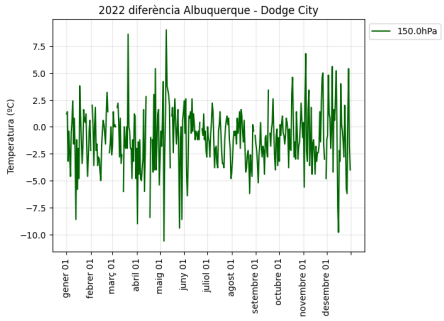
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

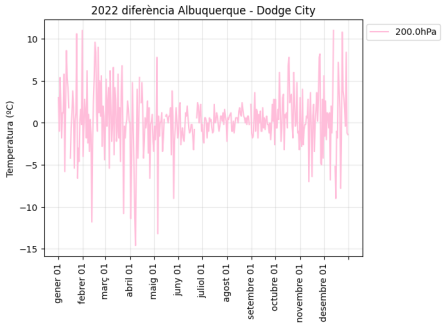
(c) Pressió 50hPa.



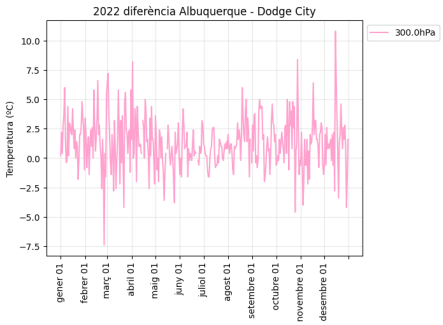
(d) Pressió 100hPa.



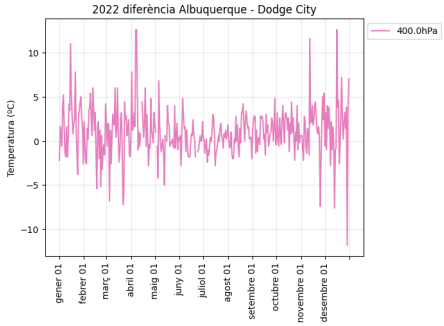
(e) Pressió 150hPa.



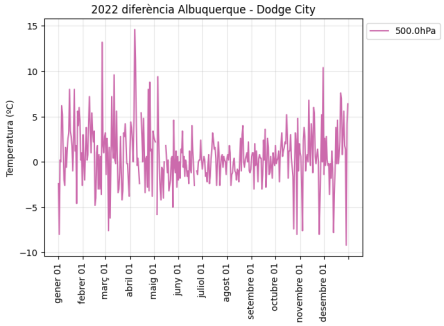
(f) Pressió 200hPa.



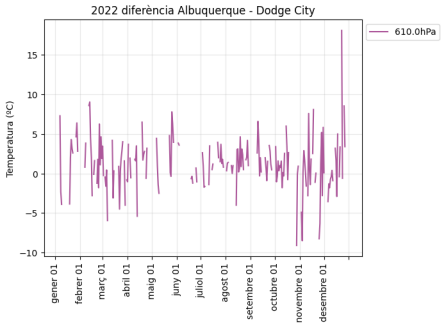
(g) Pressió 300hPa.



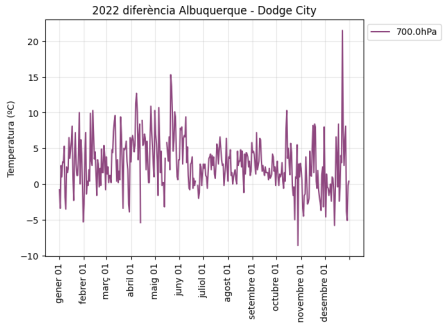
(h) Pressió 400hPa.



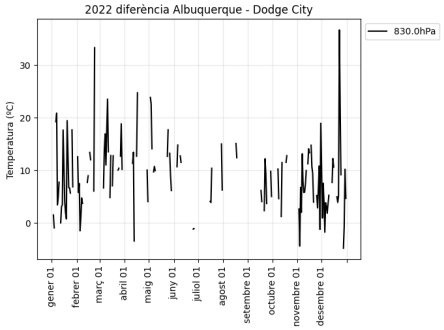
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.

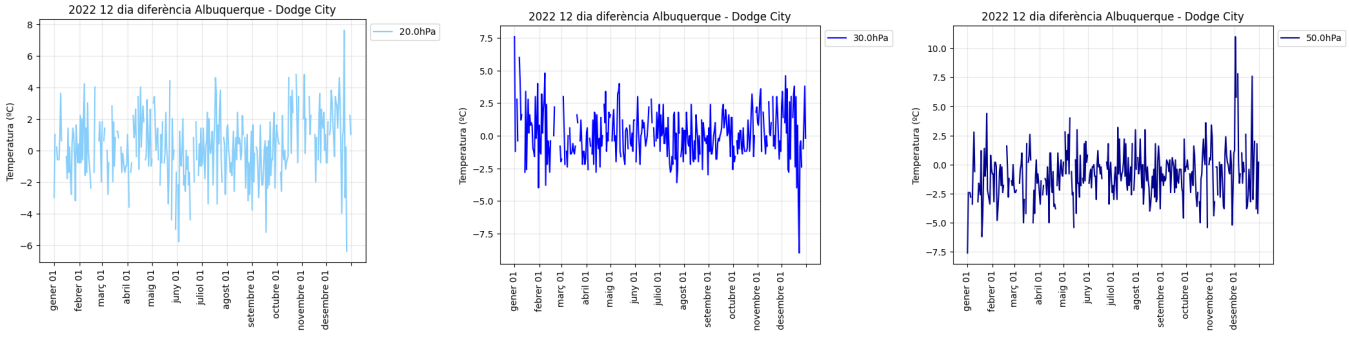


(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

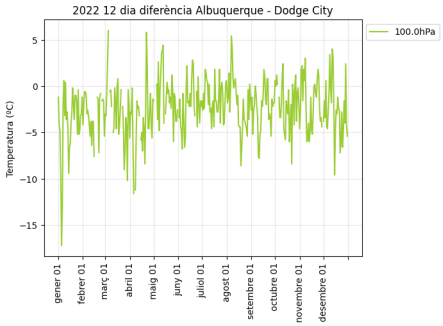
Figura 23: Gràfiques de la diferència entre la temperatura de Dodge City i Alburquerque a les 17h/18h de la tarda en el 2022 a diferents altituds.



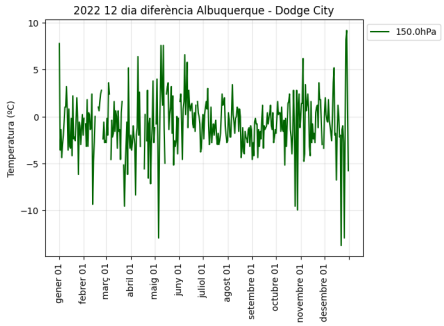
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

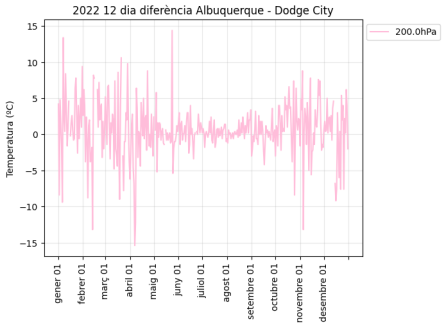
(c) Pressió 50hPa.



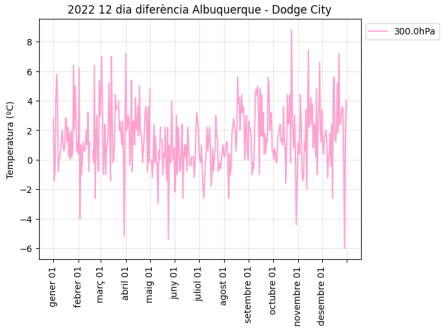
(d) Pressió 100hPa.



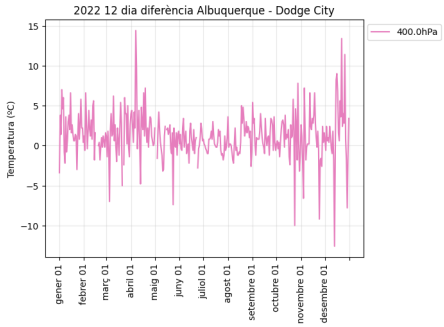
(e) Pressió 150hPa.



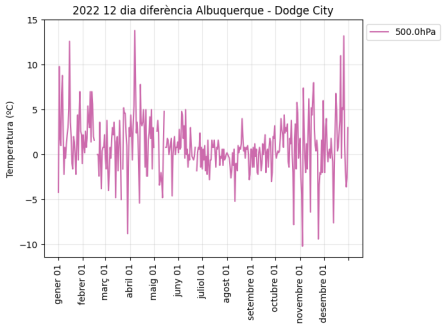
(f) Pressió 200hPa.



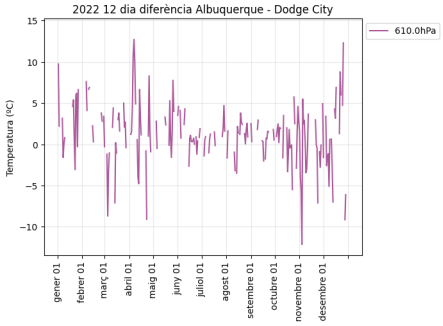
(g) Pressió 300hPa.



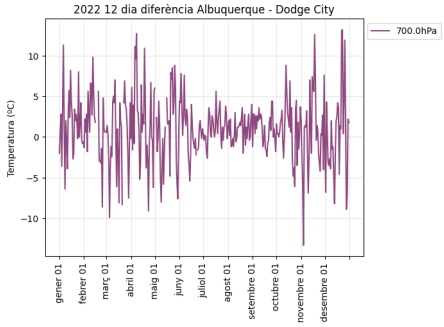
(h) Pressió 400hPa.



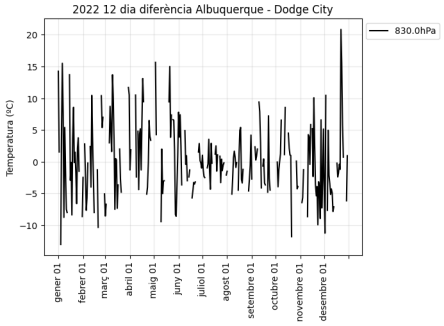
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.

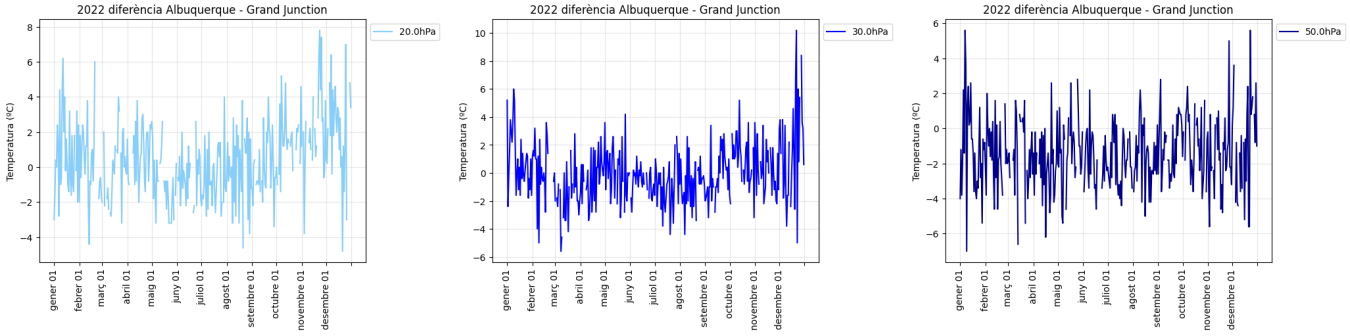


(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

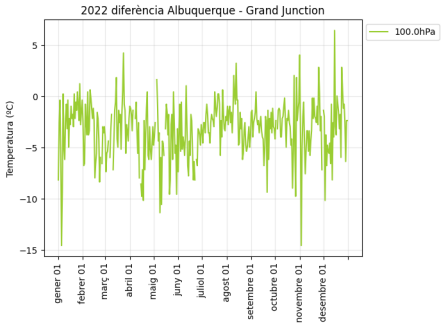
Figura 24: Gràfiques de la diferència entre la temperatura de Dodge City i Alburquerque a les 5h/6h del matí en el 2022 a diferents altituds.



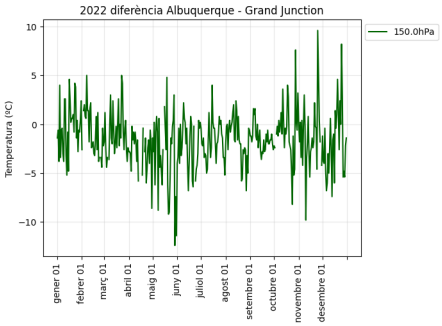
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

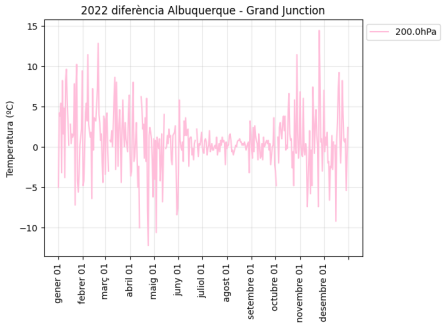
(c) Pressió 50hPa.



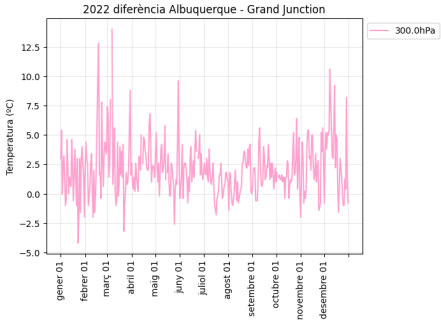
(d) Pressió 100hPa.



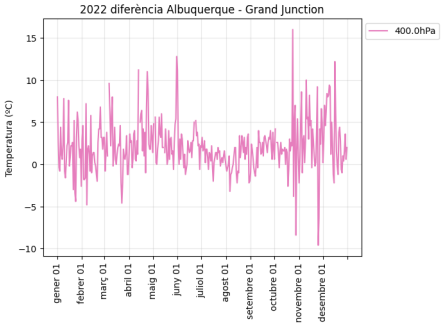
(e) Pressió 150hPa.



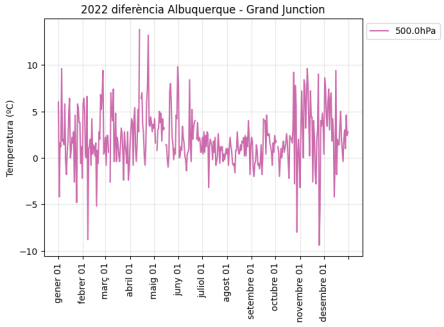
(f) Pressió 200hPa.



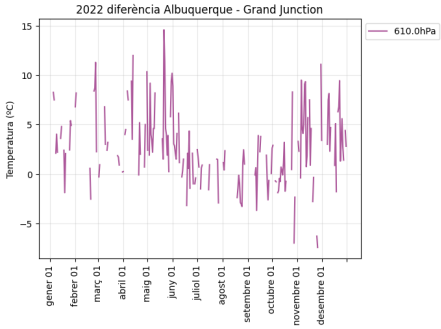
(g) Pressió 300hPa.



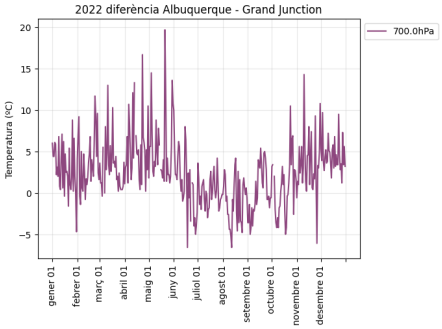
(h) Pressió 400hPa.



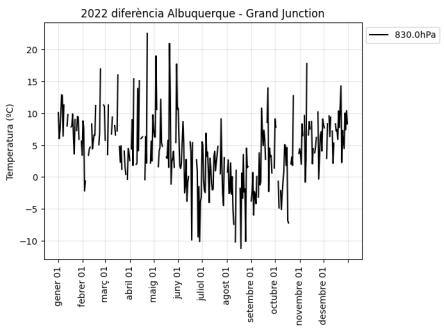
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.

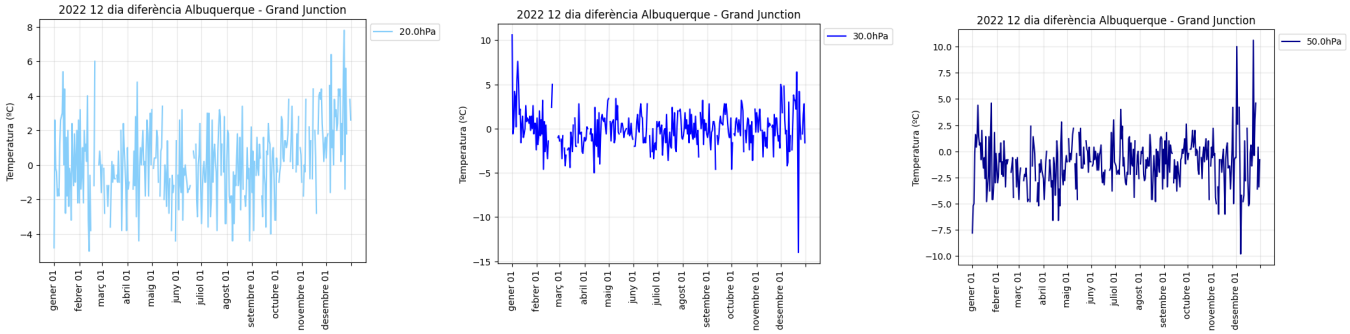


(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

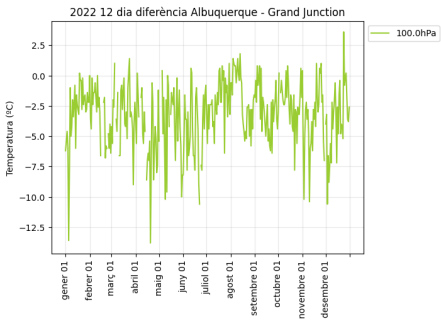
Figura 25: Gràfiques de la diferència entre la temperatura de Dodge City i Grand Junction a les 17h/18h de la tarda en el 2022 a diferents altituds.



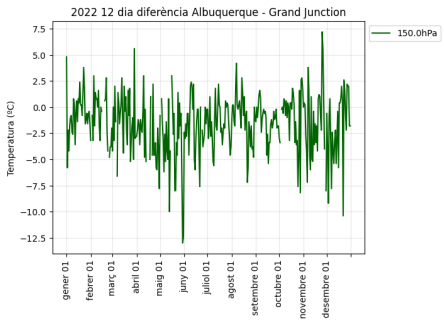
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

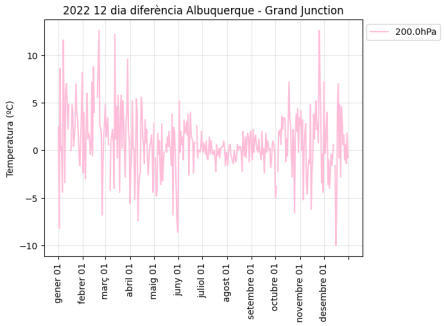
(c) Pressió 50hPa.



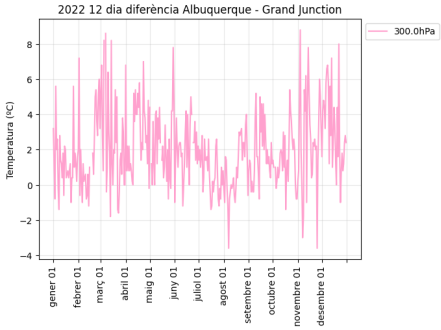
(d) Pressió 100hPa.



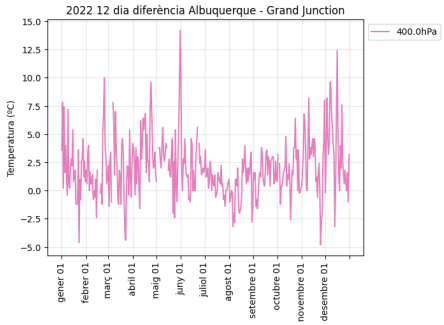
(e) Pressió 150hPa.



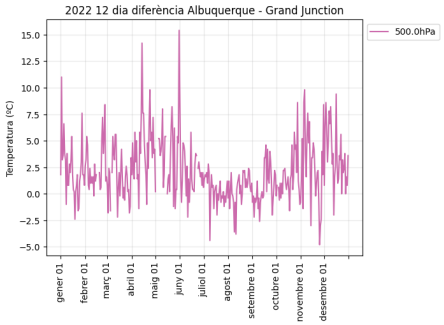
(f) Pressió 200hPa.



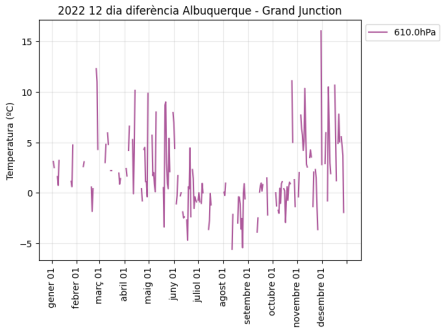
(g) Pressió 300hPa.



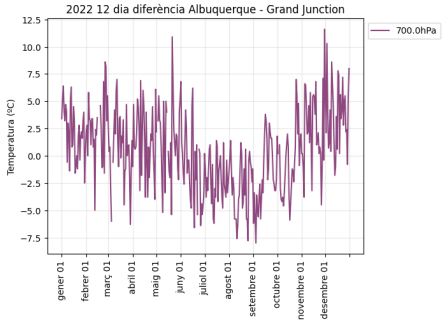
(h) Pressió 400hPa.



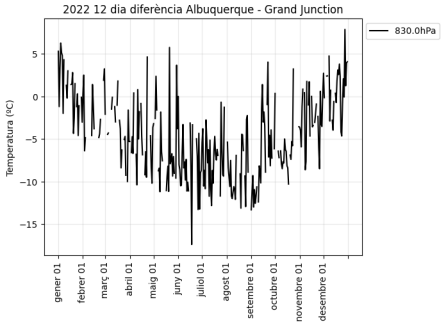
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.



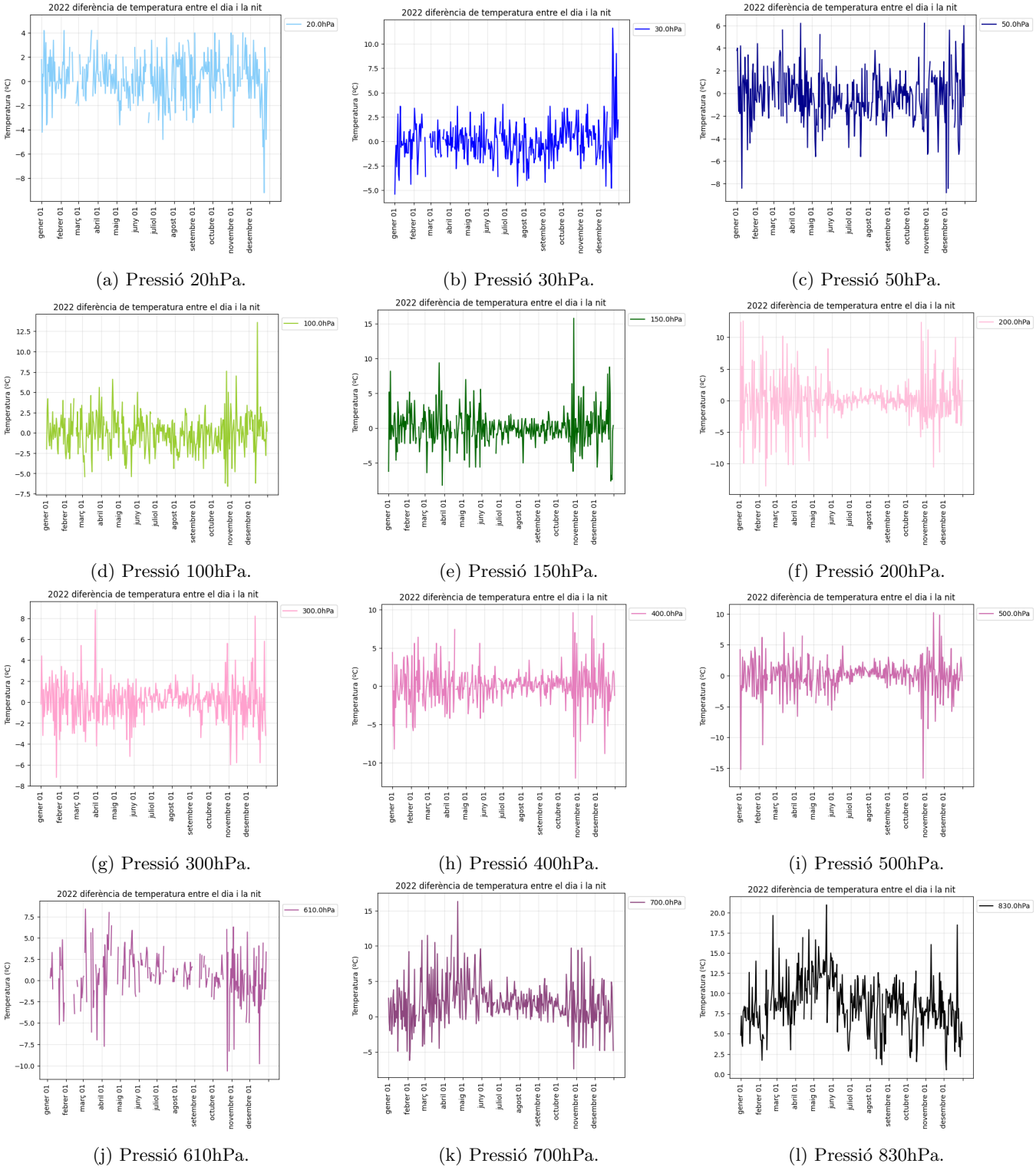
(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

Figura 26: Gràfiques de la diferència entre la temperatura de Grand Junction i Alburquerque a les 5h/6h de la tarda en el 2022 a diferents altituds.

5.4 Gràfiques per comparar nit i dia



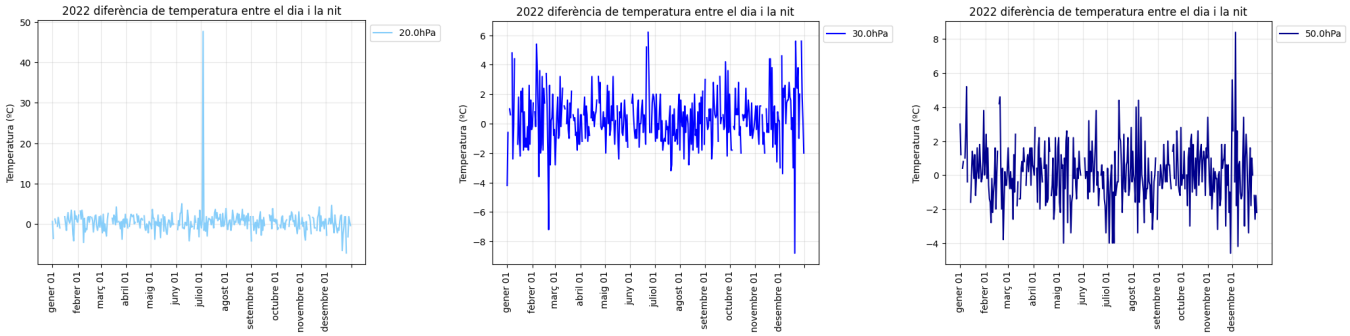
(a) Pressió 20hPa. (b) Pressió 30hPa. (c) Pressió 50hPa.

(d) Pressió 100hPa. (e) Pressió 150hPa. (f) Pressió 200hPa.

(g) Pressió 300hPa. (h) Pressió 400hPa. (i) Pressió 500hPa.

(j) Pressió 610hPa. (k) Pressió 700hPa. (l) Pressió 830hPa.

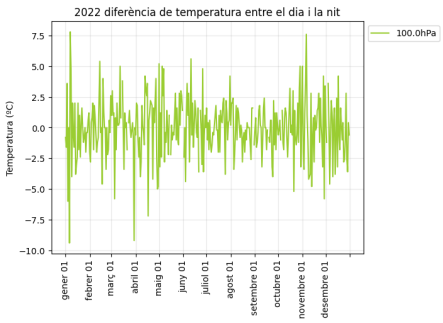
Figura 27: Gràfiques de la diferència entre la temperatura a les 17h de la tarda i les 5h del matí a Alburquerque en el 2022 a diferents altituds.



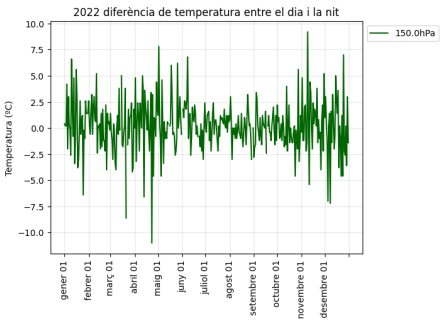
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

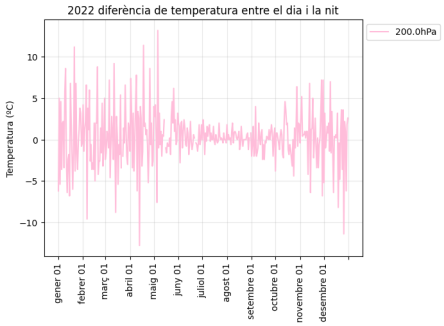
(c) Pressió 50hPa.



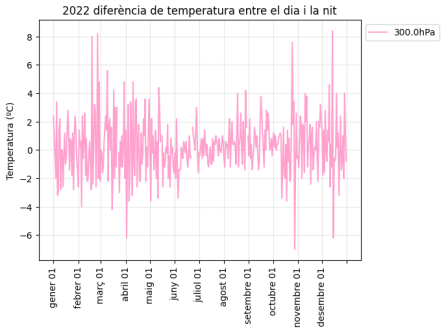
(d) Pressió 100hPa.



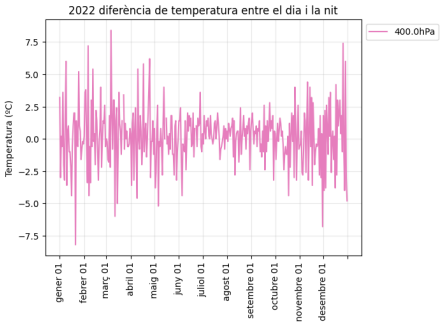
(e) Pressió 150hPa.



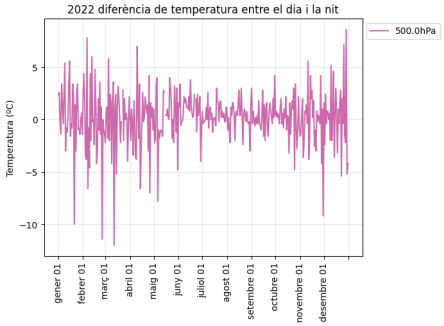
(f) Pressió 200hPa.



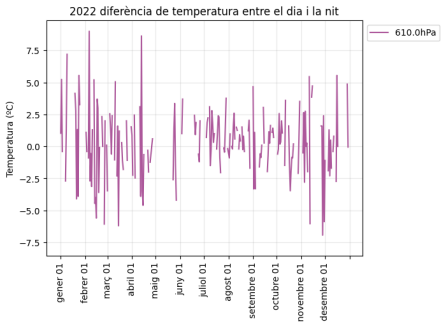
(g) Pressió 300hPa.



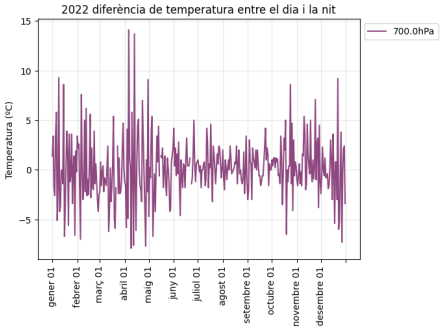
(h) Pressió 400hPa.



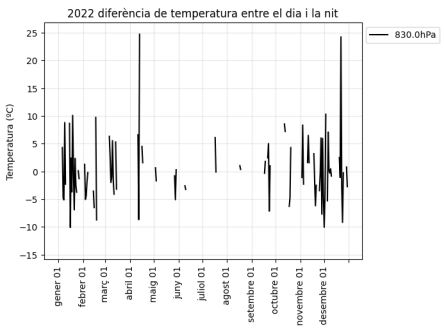
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.

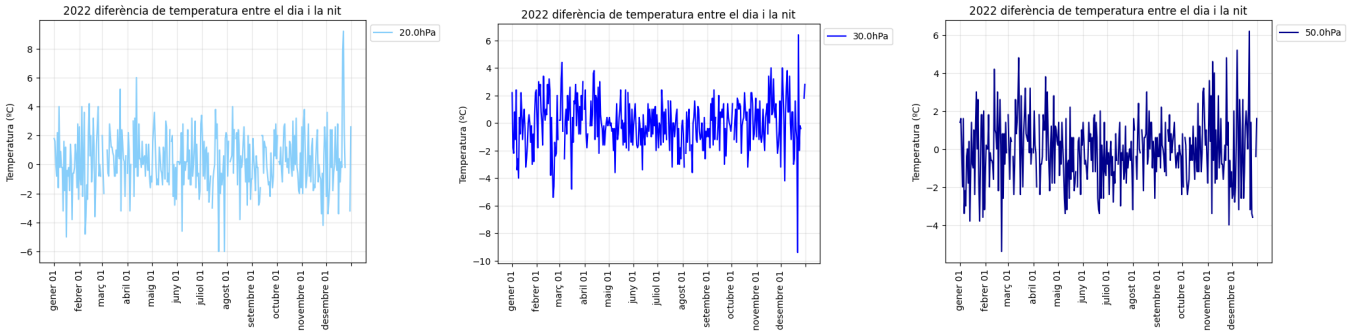


(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

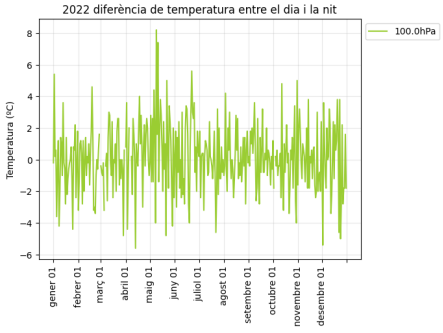
Figura 28: Gràfiques de la diferència entre la temperatura a les 17h/18h de la tarda i les 5h/6h del matí a Dodge City en el 2022 a diferents altituds.



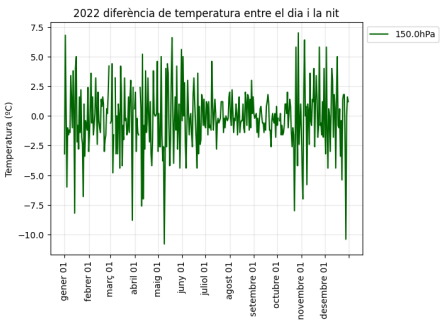
(a) Pressió 20hPa.

(b) Pressió 30hPa.

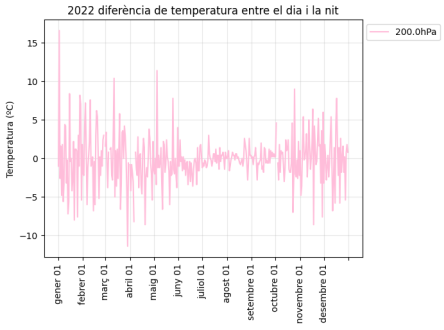
(c) Pressió 50hPa.



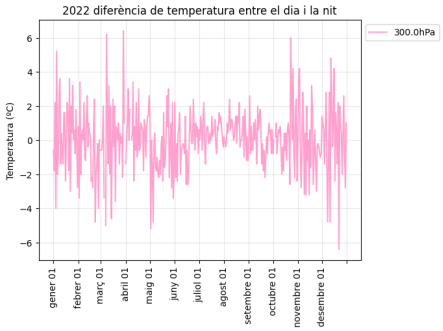
(d) Pressió 100hPa.



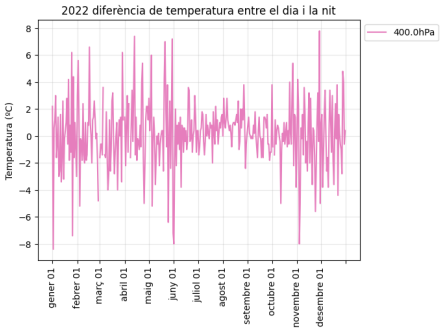
(e) Pressió 150hPa.



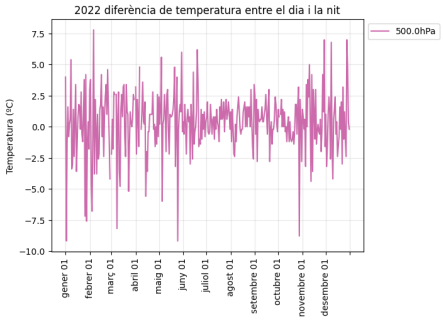
(f) Pressió 200hPa.



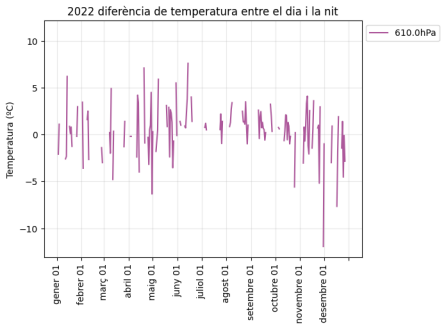
(g) Pressió 300hPa.



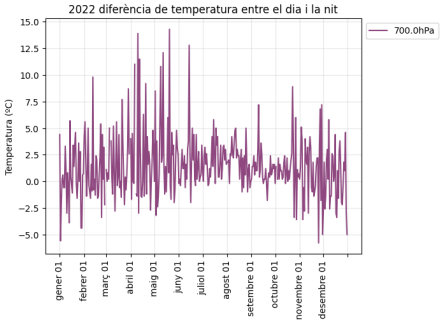
(h) Pressió 400hPa.



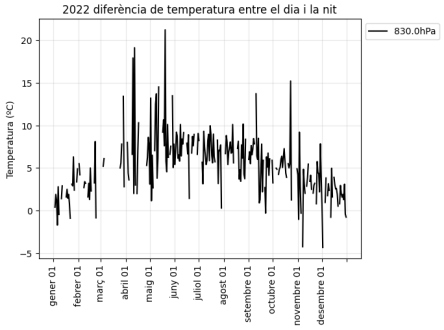
(i) Pressió 500hPa.



(j) Pressió 610hPa.



(k) Pressió 700hPa.



(l) Pressió 830hPa.

Figura 29: Gràfiques de la diferència entre la temperatura a les 17h/18h de la tarda i les 5h/6h del matí a Grand Junction en el 2022 a diferents altituds.

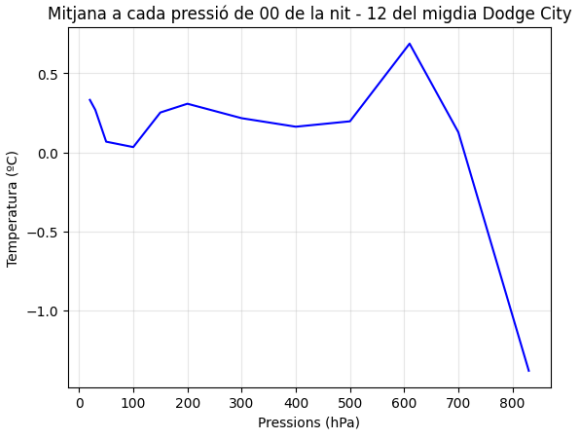


Figura 30: Mesures de Dodge City al 2022. Gràfic de la mitjana de la diferència de temperatura entre la nit i el dia per cada pressió. L'eix y indica la temperatura i el x la pressió.

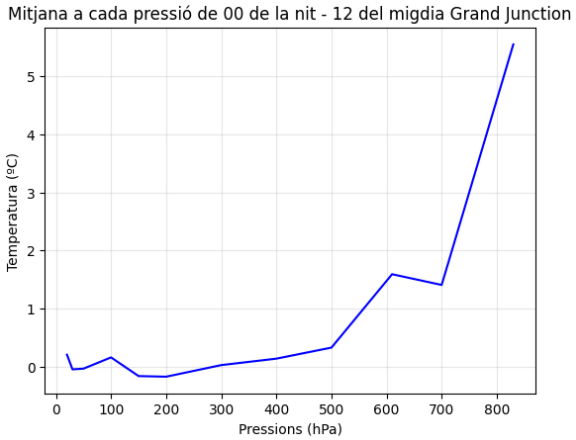


Figura 31: Mesures de Grand Junction al 2022. Gràfic de la mitjana de la diferència de temperatura entre la nit i el dia per cada pressió. L'eix y indica la temperatura i el x la pressió.

Referències

[1] Meteorological Office College. "Layer Cloud Forecasting". A: *Forecasters' reference book*. The Met. Office, oct. de 2012.

[2] Comissió Interdepartamental de recerca i Innovació Tecnològica. *Plou i fa sol*. Generalitat de Catalunya, 2015, pàg. 61 - 131.

[3] Los alamos national laboratory. *Raw Data*. URL: https://www.weather.lanl.gov/data_request_green_weather.asp (cons. 11-03-2024).

[4] Jeroni Lorente. *Meteorologia Física: Termodàmica de l'atmosfera*. Universitat de Barcelona: Departament de Física Aplicada: Secció de meteorologia.

[5] Jeremy Rishel, Scot Johnson i Darrell Holt. *Meteorological Monitoring at Los Alamos*. Los Alamos national laboratory, nov. de 2003.

[6] GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites). *Imagery*. URL: https://www.goes.noaa.gov/ (cons. 30-05-2024).

[7] Weather Spark. *Datos históricos meteorológicos de 2022 en Alburquerque*. URL: https://es.weatherspark.com/h/y/3318/2022/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2022-en-Alburquerque-Nuevo-M%C3%A9xico-Estados-Unidos#Figures-CloudCover (cons. 17-03-2024).

[8] University of Wyoming: Department of atmosferic Science. URL: https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html (cons. 09-11-2023).

DECLARACIÓ D'AUTORIA DEL TREBALL DE GRAU

Jo, Emma Betrán Clos, amb Document Nacional de Identitat 39449206C, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentat pera a la seva defensa i avaluació durant la convocatòria de Juliol del curs 2023-2024, declaro que:

- El document presentat és original i ha estat realitzat per mi.
- El treball s'ha dut a terme principalment amb l'objectiu d'avaluar l'assignatura de treball de grau en física a la UAB, i no s'ha presentat prèviament per ser qualificat en l'avaluació de cap altra assignatura ni en aquesta ni en cap altra universitat.
- En el cas de continguts de treballs publicat per terceres persones, l'autoria està clarament atribuïda, citant les fonts degudament.
- En el cas que el treball s'hagi realitzat en col·laboració amb altres investigador i/o estudiants, seran declarades amb exactitud quines contribucions es deriven del treball de tercers i quines són la meva contribució.
- Amb excepció de l'últim punt esmentat, el treball presentat és de la meva autoria.

Signat:

EMMA BETRÁN CLOS - DNI 39449206C

Firmado digitalmente por EMMA BETRÁN CLOS - DNI 39449206C
Fecha: 2024.06.13 17:59:38 +02'00'

DECLARACIÓ D'EXTENSIÓ DEL TREBALL DE GRAU

Jo, Emma Betrán Clos, amb Document Nacional de Identitat 39449206C, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentat per a la seva defensa i avaluació durant la convocatòria de Juliol del curs 2023-2024, declaro que:

- El nombre total de paraules (segons el comptatge proposat[1]) incloses en les seccions des de la introducció a les conclusions es de 6359 paraules.
- El nombre total de figures és de 13.

En total el document, comptabilitza:

$$
\begin{aligned}
&6359 \text{ paraules} \\
+8 \text{ figures (sense subfigures)} &\cdot 200 \text{ paraules/figura} \\
+5 \text{ figures (amb 2 subfigures)} &\cdot 200 \text{ paraules/figura} \\
+0 \text{ figures (amb 3 subfigures)} &\cdot 400 \text{ paraules/figura} \\
+16 \text{ línies d'equacions} &\cdot 20 \text{ paraules/línia d'equació} \\
+36 \text{ línies de taula} &\cdot 20 \text{ paraules/línia de taula} \\
&= 9999 \text{ paraules}
\end{aligned}
$$

Que compleix amb la normativa al ser inferior a 10000.

Signat:

EMMA BETRÁN CLOS - DNI 39449206C

Firmado digitalmente por EMMA BETRÁN CLOS - DNI 39449206C
Fecha: 2024.06.13 17:59:21 +02'00'

[1] Utilitza l'eina de comptatge de paraules de Word. La versió Word 365, amb llicència de campus UAB, permet obrir arxius pdf. Per tal de fer el comptatge s'ha de seleccionar el text des de la introducció fins a les conclusions. Queden exclosos del comptatge: abstract, referencies, annexos i qualsevol document que no formi part pròpiament del cos del treball.

DECLARACIÓ SUPERVISIÓ TREBALL DE GRAU

Aquest document te com a objectiu certificar que l'alumne Emma Betrán Clos, amb DNI 39449206C, ha realitzat el seu treball titulat "EFECTE D'ALTITUD: ESTUDI I REPRESENTACIO DE LA METEOROLOGIA DE LA ZONA DEL PEDERNAL MOSTRADA A L'OBRA PICTORICA DE LA GEORGIA O'KEEFFE" sota la meva direcció, i el presentarà per tal de defensar l'assignatura a Treball final de grau en el Grau de física.

L'alumne m'ha fet arribar el formulari word d'avaluació de l'activitat de l'alumne per part del director (*siusplau, feu-l'ho arribar omplert a tfg.fisica@uab.cat abans del lliurament de le memòries*)

Director del Treball	Co-director del Treball
Nom del director: Josep Vidal	Prof. Jeroni Lorente Castelló
Institució a la que pertany	Institució a la que pertany
Universitat Autònoma de Barcelona	Universitat de Barcelona
Signatura:	Signatura:
JOSE VIDAL GONZALEZ - DNI 46826244S Firmado digitalmente por JOSE VIDAL GONZALEZ - DNI 46826244S Fecha: 2024.06.12 07:15:33 +02'00'	